国外电子与通信教材系列

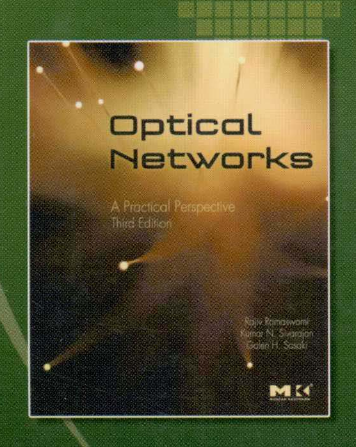


光网络

（第三版）

Optical Networks: A Practical Perspective

Third Edition



[美] Rajiv Ramaswami
Kumar N. Sivarajan
Galen H. Sasaki 著

徐安士 吴德明 何永琪 译



http://www.phei.com.cn

光网络（第三版）

Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition

本书是关于光组网技术和方法的权威著作，对元件部分和传输进行了详细的讨论，重点放在实际组网中的问题，这些问题会影响一些组织对光网络的评估、部署或开发。本书对迅速发展的技术进行了更新。这些更新包括可插拔光收发器、ROADM（可重构光分/插复用器）和电色散补偿。同时，还精选了当前一些标准的更新，如G.709 OTN光传送网标准，以及GPON、EPON和BPON接入网标准。本书扩大了对多模光纤的讨论，并扩展了以太网和多协议标签交换（MPLS）方面的内容。

本书是进行光组网——从规划到实施过程中每一步日常维护的指南。主要特点如下：

- 深度涵盖了光网络元件和传输的优化、设计和管理
- 含有丰富的实例、图表和习题，有助于开发可靠、快捷的网络
- 侧重于实际和具体的组网问题：包括各种可用的光网络解决方案

作者简介

Rajiv Ramaswami

从事光网络研究到商业应用已15年，目前是思科公司副总裁。IEEE会士，马德拉斯印度理工学院(IIT Madras)杰出校友。在美国加州大学伯克利分校获得博士学位。

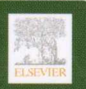
Kumar N. Sivarajan

2000年在印度班加罗尔与他人共同创办Tejas光网络公司之前，在学术界和研究实验室从事光无线和电信网络研究已有10年。他获得马德拉斯印度理工学院的科技学士学位和美国帕萨迪纳（Pasadena）加州理工学院的博士学位。

Galen H. Sasaki

在学术界从事光网络研究已16年，是美国夏威夷大学副教授。他获得夏威夷大学学士学位和伊利诺伊大学香槟分校硕士和博士学位。

本书翻译并改编自Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition，并由爱思唯尔授权出版。







ISBN 978-7-121-19785-7

定价：79.00 元



策划编辑：马　岚
责任编辑：余　义
责任美编：李　雯



国外电子与通信教材系列

光　网　络

(第三版)

Optical Networks: A Practical Perspective

Third Edition

Rajiv Ramaswami

[美] Kumar N. Sivarajan 著

Galen H. Sasaki

徐安士 吴德明 何永琪 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内容简介

本书是光组网技术和方法的权威信息来源，是一本进行光组网——从规划到实施过程中每一步日常维护的指南。其主要内容包括光网络引论、元器件、光层中的客户层、波分复用网络中的组件、控制与管理、网络生存性、WDM 网络设计、接入网、光分组交换、网络应用方面的考虑，以及实例、习题和参考文献等大量丰富的内容。

本书适合作为电子信息、通信等相关专业本科生及研究生的教材，也可为工程技术人员及相关人员了解光网络技术及其进展提供参考。

Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition.
Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki
ISBN: 978-0123740922.

版权贸易合同登记号 图字: 01-2010-0518

图书在版编目(CIP)数据

光网络: 第 3 版/(美)拉马斯瓦米(Ramaswami, R.), (美)西瓦拉詹(Sivarajan, k. n.), (美)佐佐木(Sasaki, G. H.)著; 徐安士, 吴德明, 何永琪译. —北京: 电子工业出版社, 2013.3
(国外电子与通信教材系列)
书名原文: Optical Networks: A Practical Perspective, Third Edition
ISBN 978-7-121-19785-7

I. ①光… II. ①拉… ②西… ③佐… ④徐… ⑤吴… ⑥何… III. ①无源光纤网-高等学校-教材
IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 045892 号

策划编辑: 马　岚
责任编辑: 余　义
印　　刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装　　订: 三河市鑫金马印装有限公司
出版发行: 电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本: 787×1092　1/16　印张: 27　字数: 691 千字
印　　次: 2013 年 3 月第 1 次印刷
定　　价: 79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话: (010)88254888。
质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。
服务热线: (010)88258888。

译　者　序

光网络是信息传送的骨干传送网络，并且在可预见的将来具有不可替代性。在我国社会向数字化、信息化、网络化发展过程中起着举足轻重的作用。作为现代信息流的特点之一，就是趋于越来越大的海量信息，但其传送本身受到网络中多种因素的制约，现代信息流的传送模式使得网络状态变化越来越复杂。首先，网络承载现代信息流将导致网络结构的复杂化，包括网络物理拓扑的复杂化、网络节点结构的复杂化、交换方式的多样化、业务适配与汇聚的复杂化等。网络承载现代信息流将导致网络的控管复杂化，包括通信协议多样化与可扩展，控制的可扩展与效率，网络控制的快速、可靠、稳定与鲁棒等。现代信息流还将导致网络生存性的复杂化，包括网络恢复成功率、恢复时间及资源的利用率之间的关系复杂化。研究这些问题，将涉及光网络的网络架构、多业务适配、多粒度汇聚、交换模式、传输制式与效率、网络控管及时空资源优化调度等多方面的核心技术；同时，这也是信息时代的现代信息流传送对光网络提出的新要求。因此，现代信息流传送将对我国光网络的研究和发展提出巨大挑战，如何提升目前光网络的传送能力，适应我国未来社会需要，已成为当前亟待探索、研究和解决的问题。所以，“光网络”课程对通信与信息系统学科光通信研究领域的研究生来说应是必修课程。本书内容涉及面广，深浅适度，从实际网络出发，既适合将来从事光网络方面研究的研究生，也适合从事光网络方面应用的工程人员，甚至适合不是光网络专业人员但与光网络有关的人员的阅读和学习。

我所在的光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)，从 1997 年承担我国第一个有关光网络方面的项目——国家高科技 863 项目“波分复用全光通信试验网”起，到承担国家自然科学基金重大项目“WDM 全光通信试验网”，到承担我国 973 项目“Pbit/s 级可控管光网络基础研究”等一系列光网络研究课题，基本上经历了我国光网络研究发展的全过程。在此背景下，我们从 1999 年开始准备，在 2000 年将“光网络”课程与“光通信系统”课程分离，新开了“光网络基础”课程。所选教材就是本书的第一版，参考书是 Paul E. Green, Jr. 的 *Fiber Optic Networks*。当前有关光网络和光通信系统方面的教科书已经出版了不少，为了使本书的内容更加突出，我们向出版社建议，暂不翻译其中有关“光通信系统”的 3 章内容，即原第 2 章“信号在光纤中传输”、原第 4 章“调制与解调”和原第 5 章“传输系统工程”。因出版社征得了本书原作者的同意，故我们翻译的本书只有 10 章内容。但在本书第 2 章(原书第 3 章)“元器件”中保留了一些光通信系统的部分内容，如发射机、检测器等，以及保留了附录中相关内容，以保持本书相对完整性。

从本书 3 个版本的前言可以看到本书内容的增删和改版的过程，反映了随着光网络从第一代到第二代的演变对光网络研究内容的深刻变化。这种变化还在不断发展。我们在教学过程中，也会每年补充一些最新的研究内容和光网络最新的进展，以作为课程的补充内容供学生讨论。我们课程的对象主要是通信与信息系统光通信专业方面的研究生。另外，无线通信及物理学院对光网络感兴趣的研究生也选择了这门课程。课程教学采用了互动形式，研究生需要针对某个专题进行准备，讲述他们对该专题的理解并与大家一起讨论。这样，研究生就

不仅仅是听课，而要理解专题内容，熟悉所搜索的相关资料，并具有与其他人正确交流和表达的能力。

我们共有三位翻译人员，分别为徐安士教授，博士生导师;吴德明教授，博士生导师；何永琪教授级高工，博士生导师。我们都是多年参与光网络与光通信系统研究的教员。徐安士教授翻译了本书第 1、7、8、9、10 章，Green 先生的序言，三个版本的前言，以及附录 B、C 和 J。吴德明教授翻译了第 2、3、4 章，以及附录 D、E、F、G、H 和 I。何永琪教授翻译了第 5、6 章。附录 A 和中英文术语对照表是在翻译前由三人共同讨论决定的。吴德明教授对徐安士教授所翻译的章节进行了校对，徐安士教授也对吴德明教授和何永琪教授所翻译的章节进行了校对。最后由徐安士教授统一归纳整理，包括统一书中用词，删去了一些与改编时所删章节相关的字句，附录中公式也按此原则进行了相应修改。

由于我们平时较忙，以至于本书的翻译一直持续了两年。翻译之中难免还会存在一定错误，盼请读者指正，也期望本书的内容与翻译能符合读者的要求。

徐安士

2012 年 11 月 10 日

区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)

北京大学科学技术学院现代通信研究所

lyrxas@ pku. edu. cn

序

不久前，每当有人想有效地发送信息，实际上只有两种选择——通过有线或无线发送。这种情况持续了几十年，直到20世纪60年代中期，光纤革命开始了，一开始是悄悄的，然后随着研究力度的加强，人们开始明白通过微小的一丝玻璃束发送光脉冲并不是太疯狂。现在这种革命正在全力以赴，仅在美国每天敷设的光纤就有4000光纤英里。在许多应用中，光纤正在取代电缆，逐渐地，它正在成为两个新兴的主导传输技术之一，另一个是无线通信。其中之一(无线)可以达到任何地方，但它在到达之处并不做太多事情，而另一种(光纤)将永远不可能到达任何地方，但它无论到达何处却确实做了很多事情。在光纤通信早期，人们就意识到这种简单的玻璃介质具有令人难以置信的大带宽容量等待被采掘。如果实际需要它，则这个时代应该会到来，而且我们也应该能指出如何来挖掘它。现在这个时代已经到了。需求在这里，而解决方案也在这里。

本书描述了一场革命之中的一场革命，大家现在熟悉的光纤容量已得到开发，可以载负更多的信息、处理更广泛的各种传输类型，以及提供更好的可靠性和易用性。在很多地方，安装光纤仅仅作为一种比安装铜缆更好的方式，还没有证实这样做的结果足以满足对吉比特带宽容量的需求。人类天生的对带宽越来越大的渴求，再加之越来越多的人意识到富有想象力地利用光纤所带来的其他灵活性，导致人们去探索全光网络，这就是本书的主题。这样的网络就是以新的方式，无论是采用波分复用还是采用时分复技术来组成整个网络结构，其信息都以纯光信号的形式通过各种方法从一位用户位置传送到另一位用户位置。

当我在1993年尝试出版同类书籍时，没有人能确定光网络是否能取得巨大的成功。如果失败，光网络将以“究竟发生过什么事情……”的技术故事而不复载入史册，虽然这种技术书面上听起来很棒，但是却从来没有在现实世界中成功。我的书 *Fiber Optic Networks* 用了大部分篇幅讨论有关构建码块技术和慨叹其局限性，因为很少谈及真实网络、与它们有关的结构考虑，以及它们曾为任何人做过什么好的事情。

在过去的四年中，光网络确实真的实现了，它本质上基于波分复用技术。本书作者Ramaswami和Sivarajan，是这种成功的主要体系结构的设计者，已纠正了像我所著的书那样的早期书籍的不足。现在每年有数亿美元的波分复用组网系统正在出售，只生产光网络产品的新的大公司已经建立，带宽瓶颈正在缓解，以及协议激增的混乱状态由于这一显著透明的组网新方式而得到控制；更重要的是，对下一步网络如何发展有了丰富的体系结构方面的认识。网络专家，刚经历像Web一样令人兴奋的新奇事物，现在又有另一种奇妙的天地可大展才华。整个光网络的概念本身就魅力无穷——基于具有数千吉比特每秒容量的介质，却又这么小得几乎看不见；发射机不比一粒盐大；放大器在光域放大了大量带宽；传输设计越过了50年来之不易而又复杂的编码；对调制和均衡的深刻见解；以及在网络架构中纳入了通常在传统分层机制低层难以实现的许多功能——这些都是读者期待阅读本书的一些新的有趣的主题。

为了理解在这一场革命之中的这个新组网革命，必须要有经验丰富的人带领我们进入许

多人尚不熟悉的这一领域。由于本书作者具有物理和网络架构方面优秀的综合知识，是绝对有资格引领我们学习的。当你花了一段时间阅读本书后，就能更彻底地熟悉所有重要的问题：现在是如何影响光网络的、网络的潜力和局限性是什么，以及它们如何使基于电时分复用的许多传统通信网适应我们当前的需求。无论你是一位计算机网络专家，想知道如何利用光纤来突破你的系统因带宽瓶颈所产生的网络容量限制；还是一位规划者或实施者，试图使你的电话网络永不落伍；或者你是一位教员，想适当地更新你的通信工程课程内容；亦或你是一位学生，想找一份有趣而待遇又好的工作，或你是一位需要再踏上新职业生涯的中年人，这本书都能为你们提供所需的帮助。

作者描述了在一个崭新的而其他书籍还没有涉及的领域内正在发生的事情和将要发生的事情。我从阅读本书中学到了很多知识，并期望你们也能学到很多。

Paul E. Green, Jr.

光网络技术泰乐公司(Optical Network Technology Tellabs, Inc.)董事

第三版前言

自从2002年本书最后一版出版后，光网络已相当成熟。一系列新技术，包括可重构光分/插复用器和复杂的调制格式在内，已成为当前的主流技术，并出现了从电信网到在光纤基础设施上运行分组交换的重大转变。我们将其中许多内容纳入了本修订版。

在第2章中，我们扩大了对多模光纤的讨论，并补充了光子晶体和塑料光纤一节。第6章已重写了有关通用成帧规程、光传送网和弹性分组环(RPR)的新的一节。同步光网络(SONET)的内容现包括了虚拟级联(VCAT)和链路容量调整方案(LCAS)。也扩展了以太网和多协议标签交换(MPLS)的内容，其中包括开发这些技术来支持电信级业务。第7章专门讲述WDM网络基本元部件的结构考虑，我们已经更新了可重构光分插复用器(ROADM)这一节。第8章反映了网络管理和控制方面的变化，包括更多对分组传送因素的探讨。第9章包括了以太网、MPLS和RPR等客户层协议在内的网络生存性，其中重要的是理解光网络在生存性方面所起的作用。

与先前的版本一样，本书打算便于广大读者使用，包括学生、光器件方面的工程师、设备和业务提供商、网络规划者、投资者、风险投资者，以及工业和投资分析师等。它可以作为电气工程和计算机科学专业研究生的课程教科书。采用本书作为教材的教师，可通过网址textbooks. elsevier. com，输入ISBN(书号)9780123740922，搜索出本书英文版信息，并按照界面提示注册后，即可获得本书习题解答①。

我们要感谢Karen Liu对于修改第2章所提供的宝贵协助，特别是对多模光纤、光子晶体和塑料光纤那一节。我们也感谢Ori Gerstel在光网络方面有深刻见解的讨论，以及感谢Parthasarathi Palai在DWDM网络案例研究方面所做出的投入。

第二版前言

自本书第一版1998年2月出版以来，我们目睹了光网络得到令人深刻印象的蓬勃发展。往常只有相当少的一部分研究人员和工程师们对光网络感兴趣，但现在许多人都对光网络抱有极大兴趣，他们包括学生、光元件和设备方面的工程师，以及业务提供商、网络规划者、投资者、风险投资者及工业和投资分析师等。

过去三年来随着技术迅速进步和光网络的广泛部署，出版本书第二版就显得很有必要了。在第二版中，我们试图包括光网络及相关技术的最新进展，并也想使本书更容易被有兴趣学习光网络的大众所接受。基于这种想法，我们已经重写了几个章节，增加了大量新材料，并删除了一些与实际光网络不相关的材料。我们也更新了参考文献，并增加了一些新的习题。

本书的主要改变如下：我们主要重写了介绍，以反映当前对光网络的理解；增加了“传输基础知识”一节，对非业界人士介绍了光网络和波分复用(WDM)技术中常用的一些术语。第2章已经增加了有关色散管理和孤子的重要的一节，该节还描述了现在正在使用的不同类型的光纤。第3章涵盖了电吸收调制激光器、可调谐激光器、拉曼放大器和L波段掺铒光纤放大器，并且明显扩充了光开关这一节，使之包括微电机系统(MEMS)和其他技术在内的新型开关。第4章覆盖了归零码调制和其他更新的调制格式，如双二进制调制，以及前向纠错技术，这些现已广泛用于高比特率

① 若需帮助，可联络电子工业出版社外版教材教辅支持电话：010-88254555或发邮件至te_services@phei.com.cn——编者注。

系统中。第5章现在包括扩大了覆盖范围的色散和极化效应，这是影响高比特率、长距离系统设计的重要因素。

本书有关网络章节已经完全重写和进行了扩充，这反映了该领域所取得的明显进展。这些章节内容安排如下：第6章现在包括扩大覆盖范围的SONET/SDH、ATM和IP。第7章专门讲述WDM网络基本元部件的结构考虑。第8章尝试为光网络中网络设计和路由等相关问题提供统一的看法。第9章明显扩大了网络管理和控制的覆盖范围。第10章专门讨论网络生存性，详细讨论了光层保护。第11章介绍了接入网，重点是新兴的无源光网络(PON)。第12章提供了最新报道的光分组交换网络。最后，第13章主要集中在网络部署考虑，意欲为读者提供电信网络如何发展的综合性理解，包括了一些典型的长途网络和城域网方面的详细的网络规划案例研究。

目前，在这一领域有许多标准机构积极制定标准。在附录中增加了相关标准列表。此外，也在附录中增列了本书使用的缩写，并将一些更先进的脉冲传播资料列入了附录。

本书删除了广播选择网络这一章，因为这些网络现在主要处于学术兴趣上。同时也删去了描述光网络测试平台这一章。

教学和学习

本书可以用来作为电气工程和计算机科学专业方面研究生课程的教科书。在我们所教的课程中包括了本书的大部分内容。第2~5章涵盖了光网络方面的组件和传输技术，第6~13章涉及了组网。为了理解组网方面的问题，学生需要具有通信网络方面本科生课程的基本知识。我们尝试让网络专业人员易于理解本书有关传输章节方面的内容。例如，首先是从网络设计师的角度以一种简单定性的方式对元件进行处理分析，然后详细解释它们的工作原理。预先具有半导体和电磁学方面的一些知识，将有助于充分理解部分章节中的详细处理。

致谢

我们很幸运有一组优秀评审员，他们尽力详细阅读了本书所有章节，并在本书内容和素材方面提出了许多建议。他们在塑造这个版本方面的作用是非常宝贵的。我们要特别感谢Paul Green、Goff Hill、David Hunter、Rao Lingampalli、Alan McGuire、Shawn O'Donnell、Walter Johnstone、Alan Repech、George Stewart、Suresh Subramaniam、Eric Verillow和Martin Zirngibl。另外，我们要感谢Bijan Raahemi、Jim Refi、Krishna Thyagarajan和Mark R. Wilson对一些专题的投入并提出了一些建议，指出了本书第一版中的一些错误。Mark R. Wilson根据他上的课程向我们提供了一些面向应用的习题，我们已将这些习题收集在本版本中。我们还想感谢Amit Agarwal、Shyam Iyer、Ashutosh Kulshreshtha和Sarath Kumar，他们让我们使用其网状网络设计工具，感谢Ashutosh Kulshreshtha详细计算了网状网络设计实例，Tapan Kumar Nayak计算了光路拓扑设计实例，Parthasarathi Palai仿真计算了EDFA增益曲线，Rajeev Roy验证了我们的一些计算结果。

第一版前言

光纤光学已经成为电信和数据网络基础设施的核心。光纤是任何超过每秒几十兆比特、距离超过1 km以上的数据传输的首选方式。第一代光网络主要用光纤替代铜电缆，在较高比特率下进行较长距离的传输。第二代光网络刚刚兴起。这些网络真正利用光纤的容量实现了每秒数十吉比特至每秒太比特的整体传输容量。此外，他们还在光域开发了信号的路由和交换。技术的快速发展及对带宽永无止境的需求，导致这些网络迅速从实验室研究过渡到市场。

有几本书很好地论及了光纤传输的基本原理。然而，需要一本书来覆盖第二代光网络的传输方面，并侧重于组网，如网络架构、控制和管理等方面。因此，如果没有对构筑这些网络所需的元器件的描述，则这样一本书将不会是完整的。特别是网络架构在很大程度上依赖于这些组件，并且光网络设计人员也需要熟悉它们的性能。因此，本书试图涵盖与第二代光网络相关的元件、传输和组网问题。本书针对的是网络规划者、设计者或运营商、在电气工程和计算机科学专业方面的研究生，以及想了解光网络的工程师等各方面的专业人士。

教学和学习

本书可以用来作为电气工程和计算机科学专业研究生课程的教科书。在我们所教的课程中，涉及了这本书中的大部分内容。第一部分涵盖了光网络方面的元件和传输技术，第二部分涉及了组网。为了理解第二部分中的组网问题，学生需要有本科生课程中的通信网络和概率方面的基本知识。我们尝试让网络专业人员易于理解本书第一部分中有关传输章节方面的内容。例如，从网络设计师的角度，首先以一种简单定性的方式对元件进行处理分析，然后详细解释它们的工作原理。预先具有电磁学方面的一些知识将有助于理解部分章节中的详细定量处理。较高深的内容用星号标注，这样，即使不讲授这部分内容，也不会丢失本课程的连续性。

本书概述

第 1 章介绍了光网络。本书第一部分致力于光网络的基本技术。第 2 章介绍了光如何在光纤中传播，并涉及了损耗、色散和光纤非线性现象，这些现象在传输系统设计中起着重要作用。第 3 章概述了构建网络所需的不同组件，如发射机、接收机、复用器和开关等。第 4 章介绍了电信号如何在发射机中转换成光信号(调制过程)和它们在接收机中如何恢复成电信号(解调过程)。第 5 章则侧重于最新一代传输系统和网络的物理层设计，以及限制系统性能的因素。

第二部分专门讲述光网络的各种组网。第 6 章介绍了不同的现今还广泛采用的第一代光网络。第 7 章涵盖了广播选择 WDM 网络，这些网络适用于局域网和城域网。将在一个统一的框架下描述和比较不同的拓扑结构、媒体访问和调度方法。第 8 章介绍了采用波长路由的网络。这些网络正在从实验室进入商业部署。本章涵盖了这些网络的架构方面，重点放在关键的设计问题。第 9 章介绍如何覆盖虚拟网络，例如，如何在第二代光网络基础上运行 IP 或 ATM 网络。第 10 章涵盖了控制和管理，包括连接管理、故障管理和安全管理。第 11 章介绍了几个重要的波长路由实验示范网、现场试验和原型。第 12 章介绍了光纤到路边、光纤到家庭接入网应用的无源光网络解决方案。第 13 章涉及了在不同类型的电信网络中部署新的第二代技术的相关问题。第 14 章讲述了光时分复用网络，该网络当今还处在实验室研究之中，但在每个 WDM 信道上提供很高的传输比特率方面具有进一步的发展潜力。

附录包括了一些随机过程和图论的基本知识，可作为背景资料阅读。第一部分(技术)中所使用的大量符号和参数也在附录中进行了归纳总结。

致谢

首先也是最重要的，想感谢 Paul Green 将我们引入了这一领域，多年来成为我们的良师益友，以及为本书撰写前言。我们想特别感谢 Rick Barry、Ori Gerstel、Ashish Vengsarkar、Weyl-Kuo Wang 和 Chaoyu Yue，他们详细审阅和讨论了本书的部分或全部材料。另外，我们还要感谢 Venkat Anatharam、Dan Blumenthal、Kamal Goel、Karen Liu、Roger Merel、Rick Neuner 和 Niall Robinson 为本书提供了建议。我们也想感谢 Rajesh M. Krishnaswamy 为 10.2.2 节完成了一项仿真，感谢 A. Selvarajan 回答了一些与我们技术相关的问题，感谢 Chandrika Sridhar 帮助准备了习题答案。

目　　录

第1章　光网络引论

随着新千禧年的开始，我们看见通信产业正在产生巨大的变化，这些变化将对我们的生活方式产生深远的影响。有几个原因促成了这些变化。第一个也是最重要的一个原因是社会持续不断地增大对网络容量的需求。这个需求被许多因素所推动。由于互联网和万维网在用户数量和上网时间两方面的巨大发展，因此，每一位用户所占用的带宽是一个重要的因素。许多年来互联网的流量一直飞速增长。近些年来对增长速度的估计差别很大，一些早期估计认为每四至六个月增长一倍。尽管估计不同，但对增长速度估计总是很高的，最近估计年增长率大约在50%左右。同时，宽带接入技术，如能提供给每位用户1 Mb/s量级的数字用户线(DSL)和电缆调制解调器(cable modem)已普遍应用。例如，在2008年美国大约55%的成年人家中已有宽带接入，而只有10%的家庭通过28~56 kb/s的电话线拨号上网。光纤用户呈现稳定增长，亚洲市场表现出最高的市场渗透。

同时，今天的商业依赖于高速网络来管理其业务。这些网络被用来连接公司内部的多个地点，以及处理公司之间的业务。那些曾经租赁155 Mb/s速率线来连接其国内各分部的大公司，现在一般都租赁1 Gb/s来连接了。

需求增长和带宽成本之间也有很强的相关性。技术进步已经连续成功地降低了带宽成本。成本降低反过来又驱使开发新的应用，这些应用又使用更多的带宽并影响了行为模式的发展。一个简单的例子就是打电话越便宜，人们就花越多的时间打电话。这样的技术开发反过来又驱动对网络更大带宽的需求。这种良性循环没有迹象表明在不久的将来会有减弱的迹象。

在行业内引起重大变化的另一个因素是电信产业放松管制。众所周知的事实是垄断阻碍了产业的迅速发展，垄断企业能够获得时间来适应改变，没有动力降低成本和提供新的业务。对垄断行业放松管制已经刺激市场上的竞争，这反过来又导致了更低的成本和更快地部署新的技术和业务，并且也导致了形成许多新业务的提供商，以及产生给这些提供商销售设备的新公司。

另外，网络流量现在主要是数据，而不是传统的语音通信。以前的网络主要用来支持语音业务，而不是数据业务。现在，网络普遍传送数据业务，并能够为一些实时应用业务提供服务，如实时语音和电视业务等。

这些因素驱动了高容量光网络的开发和从实验室研究到商业应用的迅速转换。本书旨在涵盖光网络技术、系统和网络问题，以及经济和其他部署的考虑。

1.1　通信网络体系结构

这本书的重点主要是所谓的公共网络，它是由业务提供商，或按他们通常的叫法，由运营商来操控的。运营商利用其网络为他们的顾客提供各种业务。运营商本来是一些电话公司，但是，现在有许多不同种类的运营商在不同的商业模式下运作，他们之中许多人

甚至不提供电话业务。除了提供电话和线路租赁业务的传统运营商之外,有许多运营商专注于互联网业务提供商(ISP)之间的相互链接,还有一些运营商专门提供批量带宽给其他一些运营商,甚至有一些实际的运营商虽提供业务但没有属于自己的任何基础设施。

在许多情况下,运营商拥有属于自己的资源(如光纤链路)和网络内部配置的设备。建立光纤链路需要用地特许,不是任何人都能挖开街道的。现在采用了许多不同的方式敷设光缆——掩埋在地下、安装在电线杆上、掩埋在石油和天然气管道旁,以及沿着铁路敷设等。还有一些情况是一些运营商向另外一些运营商租赁设备,然后利用这些租赁来的设备提供一些增值业务。例如,一家长途电话公司可能完全没有自己的网络,而是简单地从其他运营商处购买带宽后再将带宽分成更小部分后卖给终端用户。

本地电信局(LEC)在城域网中提供本地业务,长途电信局(IXC)提供长途业务。这种区别能够很快地将本地电信局的业务扩展到长途,同时长途电信局的业务也将扩展到本地。为了更好地理解这种变化,需要回顾电信产业放松管制的历史。美国在1984年前只有一家电话公司——AT&T。AT&T与隶属于其地方的贝尔运营公司一起垄断了美国的长途和本地业务。随着1984年美国通过解除电信管制法案,AT&T公司被分成了只允许经营长途业务的AT&T公司和一些贝尔子公司,或称为地方贝尔运营公司(RBOC)。这些地方贝尔运营公司只允许经营本地业务,而不允许经营长途业务。长途业务管制法令被取消后,其他许多公司,如MCI公司和Sprint公司则成功地进入了长途业务市场。而那些贝尔子公司本来就以经营短途业务著称,因而仍然垄断本地短途业务。产业界已经得到了长足的行业整合,其中RBOC甚至收购了长途电话公司。例如,RBOC西南贝尔通信公司甚至收购了AT&T公司,组成了新的AT&T公司,并且Verizon通信公司(原RBOC贝尔大西洋公司)收购了MCI公司等。现在地方贝尔运营公司是下面三家公司:AT&T公司、Verizon和Qwest。除了地方贝尔运营公司之外,还有其他一些有竞争力的地方电信局(CLEC),它们较少受到控制,并与地方贝尔运营公司在地方短途业务上形成竞争。

上面使用的一些术语主要流行于北美。在欧洲曾有过类似的情况,政府全资拥有的邮局、电话和电报(PTT)公司在它们各自的国家内垄断了其行业。但在过去十年里已经开始放松管制,在欧洲已经有一些新的运营商既提供地方短途业务,又提供长途业务。

在本书的其他部分,将采用一种更普遍的方法,把运营商分类为城域运营商和长途运营商。虽然同一运营商可能同时提供城域和长途业务,但用来传送长途业务的网络与城域网稍有不同,因此我们还是保留了这种分类。

与公共网相比,专用网是单位自有、由自己运行并供内部使用的网络。但这些公司中的大多数又依赖于公共网提供的容量来配置专用网,特别是这些专用网穿过公众用地,并且在该建网用地又必须得到准许的时候。横跨在建筑物内最多相距几千米的网络称为局域网(LAN);而那些跨越校园或城区,相距数十千米或几百千米的网络称为城域网(MAN);那些相距更长距离,范围从几百千米到几千千米的网络则称为广域网(WAN)。下面讨论的公共网也将采用同样的分类。

图1.1表示了一个典型的公共光纤网结构示意图。这种网络是庞大而复杂的,网络的不同部分可能属于不同的运营商,并由运营商各自运行。网络中的那些节点是中心局,有时候也称为接入点(POP)。[一些情况下,接入点(POP)指"小的"节点,而枢纽节点相对指"大的"节点。]节点之间的链路由光纤对组成,许多情况下,是由多组光纤对组成。长途网络中的链路构

建往往是非常昂贵的。由于这个原因，许多北美长途网络的拓扑结构是相当稀疏的。在欧洲由于链路长度相对较短，因此长途网络拓扑结构常常是较密集的。同时，至关重要的是在某些链路产生故障的情况下，为信息流提供备份路径是绝对必要的。这些约束导致了环形拓扑结构得到广泛应用，特别是在北美。环形结构是稀疏的（每个节点只有两条链路），但仍然提供了备份路径以重新路由流量。在许多情况下，网状网实际上是由相互连接的环形网组成的。

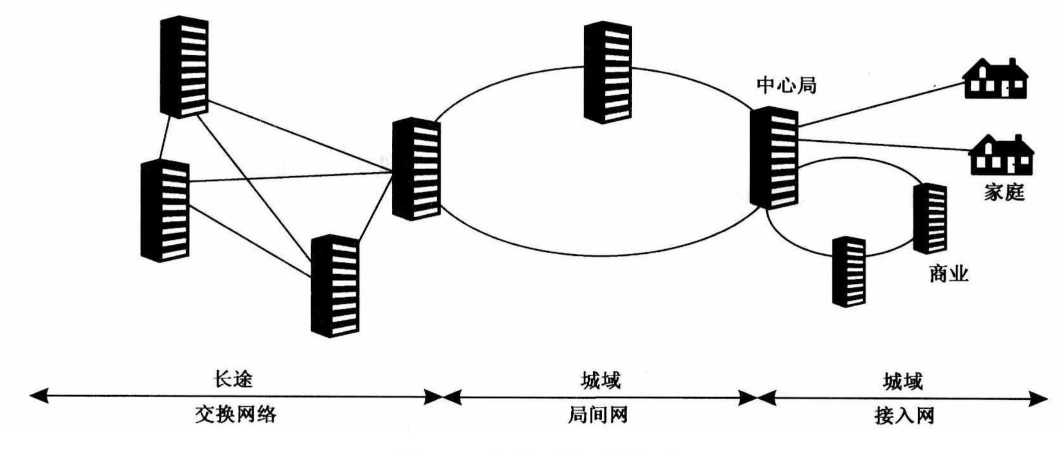


图1.1　公共网的不同部分

在高层，网络分成城域网和长途网。城域网是网络位于大城市内或地区内的那部分。而长途网是连接城市之间或不同城区之间的网络。城域网包括城域接入网和城域局间网。接入网从中心局延伸到每个商户或家庭（通常情况下，这次是指一些家园小区，而不是一些单户家庭）。接入网的覆盖范围通常是几千米远，它主要是收集客户位置到运营商网络的信息流。这样，接入网的大部分信息流都集中到了运营商网络的中心局。在城市或地区内的局间网络将一群中心局连接到一起。这个网络的中心局之间通常相距几千米到几十千米。长途网相互连接不同的城市或地区，这时中心局之间的距离是几百千米到几千千米。在一些情况下，还有一部分网络提供了城域网与长途网之间的切换，特别是这些网络是属于不同运营商运行的时候。与接入网相比，在城域局间网和长途网中流量分布是网状的（或分布的）。这里显示的距离是说明性的，很大程度上取决于网络的位置。例如，欧洲城市间的距离常常只有几百千米，而北美城市间的距离能够到几千千米远。

图1.1所示的网络是一地面网络。光纤也同样广泛应用在海底网络中。海底网络的范围可以从几百千米到数千千米，路由穿越大西洋和太平洋。

1.2　业务、电路交换和分组交换

运营商给其客户提供许多类型的业务。在许多情况下，这些都是面向连接的业务，这些业务中存在一个通过底层网连接两个部分或多个部分的概念。其不同在于连接的带宽和支持该连接的底层网络类型，这对运营商为客户提供的服务质量保证有重要的影响。网络也能提供无连接的业务。我们将在本节后面讨论这种业务。

底层网络基础设施根据流量在网络内如何复用和交换分为两种基本类型：电路交换和分组交换。图1.2说明了这两种情况下所采用的复用类型的一些区别。

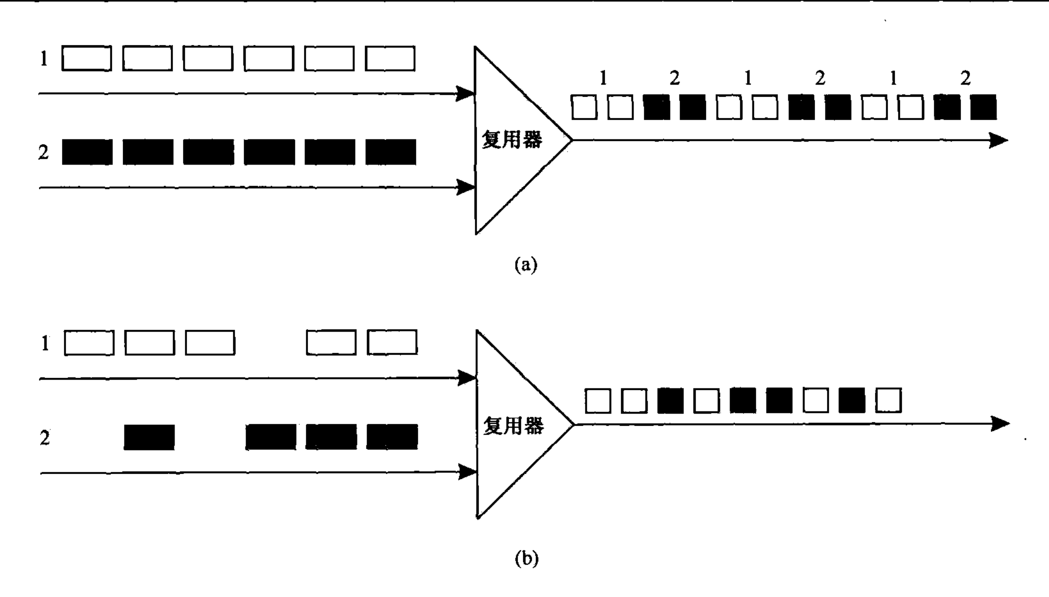


图 1.2 时分复用的不同类型：(a) 固定的；(b) 统计的

电路交换网络给用户提供电路交换连接。在电路交换中，对每一连接分配了一定数量的有保证的带宽，并且一旦连接建立则确保这些带宽在全部连接时间内有效。对于一条链路上所有电路带宽或所有连接的带宽，其总和必须小于这条链路的带宽。电路交换网络最普通的一个例子是公共交换电话网(PSTN)，一旦连接建立，它将对终端用户提供固定带宽的稳固连接(通常是 4 kHz 左右)。在运营商的中心局将这个电路转换成 64 kb/s 数字电路。该网络支持语音流，并且非常适合这种业务。

现在由运营商提供的电路交换业务包括了多种比特率的电路，范围从 64 kb/s 的语音业务一路攀升到几 Gb/s。这些连接通常由运营商租赁给他们的客户，并保持相当长的时期，从提供带宽开始，时间可持续几天、几月甚至几年。这些业务也称为专用线路业务。PSTN 网属于这一范畴，但有一个重要的区别——在 PSTN 网中，客户们拨打电话并在他们之间建立连接，但在专用线路业务中运营商通常是通过管理系统建立这种连接。这种情况正在发生变化，毫无疑问，我们会看到用户将通过更高速、专用的线路来建立连接，特别是连接持续时间变短的时候。

电路交换的问题是在处理突发数据流时它的效率不高。突发数据流的一个例子是用户敲键盘所产生的数据流。当用户正在打字时，发送的比特率或多或少是稳定的。用户暂停打字时，没有数据流可传。另一个例子是浏览万维网。当用户正在阅览刚下载的页面时，几乎没有数据可传。而当用户单击一个超链接时，新的页面就需要尽可能从网络中下载。因此，每当网络处于活动时，突发流就需要从网络得到大量带宽，否则它就需要非常少的带宽。通常，用平均带宽和峰值带宽来表征这个特点，它分别表示长期平均带宽和短期突发速率。在电路交换网络中我们就不得不保留足够的带宽来应对峰值速率，而该带宽却在大量时间内得不到利用。

分组交换被发明用来高效处理突发数据的传输问题。在分组交换网络中，数据流被分解成小的数据包。这些数据包在网络内与其他数据流形成的数据包复合在一起。这些数据包在网络内根据其目的地进行了交换。为了便于交换，数据包头加进了每个分组包的净负荷。这个数据包头携带了寻址信息，如目标地址或传输路径的下一个节点地址。中间节点从数据包

头中读取信息后再根据这些信息决定在哪里将该数据包进行交换。在目的地，属于一个特定的流的数据包被接收，并且原来的数据流将重新组合在一起。分组交换网的主要例子是互联网，该网使用互联网协议(IP)将分组从它们的源地址路由到宿地址。

当多个突发数据流在链路上复用在一起时，分组交换通常使用一种称为“统计复用”的技术。因为每个数据流是突发的，可能在任何给定时间内只有一些数据流是处于传输状态，而其他数据流不是。所有数据流同时处于传输状态的概率相当小，因此链路上所需带宽明显小于所有数据流同时传输时所需带宽。

统计复用技术改善了带宽利用率，但是却产生了一些其他的重要问题。如果更多的数据流同时处于活动状态而比链路上现有可用的带宽要宽，则一些数据包将不得不需要排队或缓存，直到链路再次出现空闲。因此，一个数据包所经受的延迟取决于有多少个数据包排在它的前面。这将使延迟成为一个随机参数。有时流量可能会高得导致数据从缓冲区溢出。当这种情况发生时，一些数据包必须从网络中被丢弃。通常，一个更高层的传输协议，如互联网中的传输控制协议(TCP)，会检测到这一情况，并确保这些数据包重传。除此之外，传统的分组交换网络甚至不支持连接的概念。属于一个连接的数据包被作为独立的实体，不同的数据包通过网络时可以采取不同的路由，这是采用 IP 网络的情况。这种无连接的业务被称为数据报业务。这导致了不同的数据包中所经历的延迟相差较大，并迫使高层传输协议将不能按序到达终点的数据包重新排序。

因此，传统上这样的分组交换网络提供的是“尽力而为”的业务。该网络力求将数据尽快地从信源发送到信宿，但不提供质量保证。现在大多数互联网确实就是这种情况。这类业务的另一个例子是帧中继。帧中继是一种由运营商提供的流行的分组交换业务，它将各个企业数据网络互连。当使用者请求帧中继服务时，在未来一定时间内他能获得一定的平均带宽，瞬间也可能大于这一带宽，但不能确保能够实现。为了确保网络不超载，用户数据速率在网络输入端可能被调准，以确保用户在该段时间内不超过其应获得的平均带宽。换言之，具有 64 kb/s带宽的用户有时可以发送 128 kb/s 速率的数据，但其他时间发送的数据可能是 32 kb/s，但是，在一段长时间内总的传送数据率不允许超过平均数据率 64 kb/s。

这种由分组交换网络提供的尽力而为的业务对许多应用是很好的，如浏览网页和传送文件，这些应用对数据的延迟要求不高。然而，一些实时视频或语音呼叫业务则无法容忍这种随机的数据延迟。因此，现在正在做巨大的努力，以使分组交换网络能够提供一些服务质量(QoS)有所保证的业务。保证服务质量的措施包括在一定程度上限制分组最长的延迟时间和延迟量的变化，以及保证为每个连接提供最低限度的平均带宽。现在互联网协议已经得到增强，可以提供类似的服务。大多数服务质量的实现依赖于一种面向连接层的概念。如在 IP 网络中，多协议标签交换(MPLS)提供虚电路，以支持终端到终端的信息流。这种虚电路强制属于该电路的所有数据包在通过网络时遵循相同的路径，以便更好地配置网络中的资源来满足一定质量服务保证，如限制每个数据包的延迟时间。不像一个真实电路交换网络，虚电路沿该电路的路径不提供固定的有保证的带宽，因为统计复用常用于复用网络内部的虚拟电路。

1.2.1　业务改变的前景展望

随着网络与技术的发展和运营商之间日趋激烈的竞争，运营商所提供的业务模式正在发生迅速变化。每条连接的带宽正不断增加，租赁 155 Mb/s 到 2.5 Gb/s，甚至 10 Gb/s 容量范

围的线路正变得越来越普遍。注意到在许多情况下，一位运营商的客户是另一位运营商，这种所谓的运营商的运营商基本上提供了大量的带宽与其他运营商的网络相互连接。另外，由于竞争加剧和客户需求，一旦有带宽需求，运营商现在需要在几分钟到几小时内，而不是在几天到几个月内迅速地提供这些连接。此外，客户更想签约短期合同，而不是从几个月到几年的长期合同。一位用户在较短时间周期内租赁大量带宽的事情，并不是不可想象的，例如，在一天的某些时段内完成大型备份、处理特殊事件或处理临时激增的需求。

改变的另一个方面是这些电路的可用性，该可用性被定义为提供给用户业务时间的百分比。运营商提供的典型可用性是99.999%,这相应于每年少于5分钟的故障时间。这反过来又需要使网络在发生光纤断裂等故障时能提供快速业务恢复功能，现在的故障恢复时间大约是50 ms。然而这只是一部分连接的故障恢复时间，而另一些携带数据的连接可能会承受更长的恢复时间。有些连接根本不需要由运营商恢复，在发生故障时用户可将这些连接上的数据重新路由。通常，快速业务恢复利用带宽冗余来实现，网络中的一半带宽作为冗余就是为了这一目的而预留的。在第6章中，将讲到一些更高级的技术可用于提高带宽利用率，但代价通常是需要较长的恢复时间。

因此，新一代的网络运营商需要建立这样一些网络：它们能够根据业务属性随时随地、灵活地按需提供带宽。“随地”是很重要的，因为运营商很少能够预测出未来信息流量需求的所在位置。因此，他们很难规划和建立根据特定的按带宽需求优化的网络。

同时，由运营商提供的综合业务正在扩大。先前讨论了不同的电路交换和分组交换的业务。现在还没有普遍实现的是，这些业务是通过分离的、相互交叠的网络，而不是通过单一的网络来实现的。因此，运营商需要操作和维护多个网络——对长期运营而言，这是非常耗资的。大多数网络在长期营运后所投入的费用(如维修、配置新的连接和升级)，远远超过了初建网络时在设备上的投资，因此运营商愿意采用能够提供多种类型业务的单一的网络基础设施。

1.3 光网络

光网络所具备的性质能够解决我们讨论过的很多问题。光网络除了能够提供大容量外，其基础设施还能提供各种业务。这些网络也日益成为能够随时随地以灵活的方式提供带宽的网络。

光纤提供了比铜电缆高得多的带宽，并且不易受各种电磁干扰及其他不良干扰的影响。因此，光纤是以超过数十兆的比特率将数据传输1 km以上的首选媒介。它也是实现短距离(数米至几百米)、大系统内部高速互连(吉比特率以上)的首选传输方法。

光纤现在被各种通信网络广泛采用。光纤所采用的长度单位常用“护套英里”来衡量。光纤护套英里数是指在网络中由多光缆组成的每一路由的光缆总长度。例如，在1条由3条光缆组成的10英里长的路由中，可以说这条光纤长度是10路由英里，或30护套(光缆)英里。每一光缆又包含多芯光纤。如果每一条光缆含有20芯光纤，则这10路由英里长度又可称为600光纤英里。一个城市或通信公司可以用护套英里来表述它所敷设的光纤长度。例如，一个城域网可能有10 000护套英里长的光纤。这是提升某地适宜作为发展信息技术实业用地的一种宣传方法。

当谈论光网络时，实际上是在谈论两代光网络。在第一代光网络中，光基本上用来传

输，只不过是提供容量而已。与铜质电缆相比，光纤具有更低的传输误码率和更高的传输容量。所有的交换和智能网络功能都在电域处理。第一代光网络的例子是SONET(同步光纤网络)和基本类似的SDH(同步数字体系)网络，这些网络分别在北美、欧洲和亚洲构成了核心电信网络基础设施，以及如光纤信道(fibre channel)在内的各种企业网。我们将在第3章中讨论这些第一代网络。

第二代光网络在光层(optical layer)中具有路由、交换及智能功能。在我们讨论第二代光网络之前，首先介绍光网络中实现大容量所需的复用技术。

1.3.1 复用技术

对复用技术的需求基于这样一个事实：对大多数业务来说，在一芯光纤中用较高数据率传输数据比在多芯光纤中用较低比特率传输数据的成本要低得多。如图1.3所示，有两种基本方法增加单芯光纤中的传输容量。第一种方法是提高传输比特率。这需要采用高速电子电路。通过所谓电时分复用(TDM)方法将多束低速数据流复用成一束高速数据流。典型复用器是将多束低比特率数据流交替间插来得到高比特率数据流。例如，可以先从第一束数据流采集一字节数据，然后再从第二束数据流中采集下一字节数据等。作为一个例子，64束155 Mb/s的数据流可以复用成一束10 Gb/s的数据流。现在在商用系统中最高传输比特率是40 Gb/s的TDM技术。为了推动TDM技术超越这些传输比特率，研究者们正在研究在光域实现复用和解复用功能的方法。这种方法被称为光时分复用。虽然光时分复用(OTDM)技术在商业上尚不可行，但实验室已经实现了将若干10 Gb/s的数据流复用到250 Gb/s，以及反过来解复用的实验。在第9章中将讨论OTDM系统。然而，在实际网络中，仅靠复用和解复用高速流的技术是远不够的。我们还需要克服这些高比特率数据流在光纤传输中所产生的各种损伤。正如将在第10章中看到的那样，传输比特率越高，解决这些损伤就越困难。

另一种用来增加传输容量的方法是所谓的波分复用(WDM)技术。波分复用技术基本上与频分复用(FDM)技术一样，后者已在无线电系统中使用了一个多世纪的时间。由于某种原因，FDM这个词被广泛用于无线电通信中，而波分复用则被用于光通信方面，这可能是频分复用技术首先由通信工程师进行了研究，而波分复用技术是由物理学家首先进行研究的原因。波分复用这个概念是通过多个载波波长(或等价的频率或颜色)同时在一芯光纤中传输数据。为了实现这一点，首先要保持波长之间具有足够的间距，这样，这些波长就不会在一阶效应上相互产生干扰。(有一些不良的二阶效应会使波长之间相互干扰。)于是，波分复用技术提供了虚拟光纤，因为它使一芯光纤看起来像多芯"虚拟"光纤，而其中每芯虚拟光纤都载负了一条数据流。WDM系统现已广泛应用于长途网和海底网，也正在用于城域网中。

WDM和TDM这两种技术都提供了提高传输容量的方法，它们是相辅相成的，因此网络中现在联合使用了这两种技术。在系统中如何组合TDM和WDM技术，现在是面对运营商的一个重要问题。举例来说，假设运营商拟建立一条160 Gb/s的通信链路。我们应该采用64个WDM信道、每信道2.5 Gb/s，还是应该采用16个WDM信道、每信道10 Gb/s？该问题的回答依赖于几个因素，包括使用该链路光纤的类型和参数，以及运营商在该链路上拟提供的业务。我们将在第10章讨论这个问题。利用联合采用TDM和WDM的方法，已实现在单芯光纤上的传输容量达到1 Tb/s左右的系统，毫不怀疑，将来在单芯光纤上能够传输更大的容量，并且传输更长的距离。

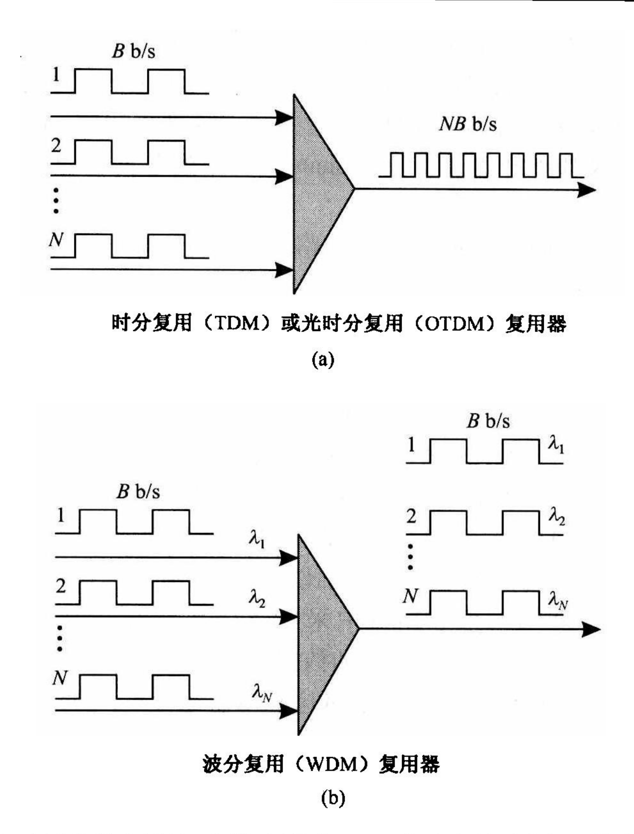


图 1.3 增加光纤传输容量的不同复用技术。(a)电或光域时分复用技术;(b)波分复用技术。这两种复用技术都需要N个数据流,每个数据流的传输比特率是B b/s,再将这些数据流复用到单芯光纤中,总的传输比特率是NB b/s

1.3.2 第二代光网络

显然，光学方法是首选的传输方法，而波分复用传输技术又被广泛应用于网络中。光网络比点到点之间的传输系统能够提供更多的功能。获得的主要优点是将一些原由电域完成的交换和路由功能转由网络的光域完成。比如，随着数据传输比特率变得越来越高，在电域处理这些数据变得越来越困难。假设在电域必须处理由每 70 字节组成的数据码块(即一个短的以太网数据包)。在 100 Mb/s 数据流中，处理这样一个码块要5.6 μs，而在10 Gb/s的数据流中，处理同样的码块必须在 56 ns 内完成。在第一代网络中，每个节点的电子设备不仅要处理终结于该节点的所有数据，也要处理穿过该节点到网络其他节点的数据。如果后面这种情况下的数据可以在光域路由直接接通过该节点，则该节点底层电子设备的负担将大大降低。这是第二代光网络的主要驱动力之一。

目前，正在部署基于这一范式的光网络。该网络的体系结构如图 1.4 所示，称之为波长路由网络。该网络将光路(lightpath)提供给它的使用者，如 SONET 终端或 IP 路由器。光路是指从源节点到宿节点通过每一个中间链路上的一个波长进行端到端的光链接。在网络中的中间节点，光路从一条链路路由和交换到另一条链路。在某些情况下，光路可沿其路由线路从一个波长转换到另一个波长。在波长路由网络中，不同光路可以使用相同的波长，只要它们不共享任何共同的链路。这就允许网络在不同部分可以重复使用相同的波长。例如，图 1.4

显示了 6 条光路。B 和 C 之间的光路、D 和 E 之间的光路及 E 和 F 之间的光路之一不共享网络中任何链路，因此可以设置使它们使用相同的波长λ_1。同时，A 和 F 之间的光路与 B 和 C 之间的光路共享了一个链路，因此必须使用不同的波长。E 和 F 之间的两条光路也必须分配不同的波长。请注意，所有这些光路在其路径中的每条链路上都使用相同的波长。如果这个网络不具备波长转换能力，则必须处理由这个问题给网络带来的约束。假设在该网络中只有两个波长可以选用，而又希望在 E 和 F 节点之间建立一条新的光路。如果没有波长转换，则将无法建立这条光路。另一方面，如果中间节点 X 可以进行波长转换，那么可以在 EX 链路上使用λ_2、在 XF 链路上使用λ_1来建立这条光路。

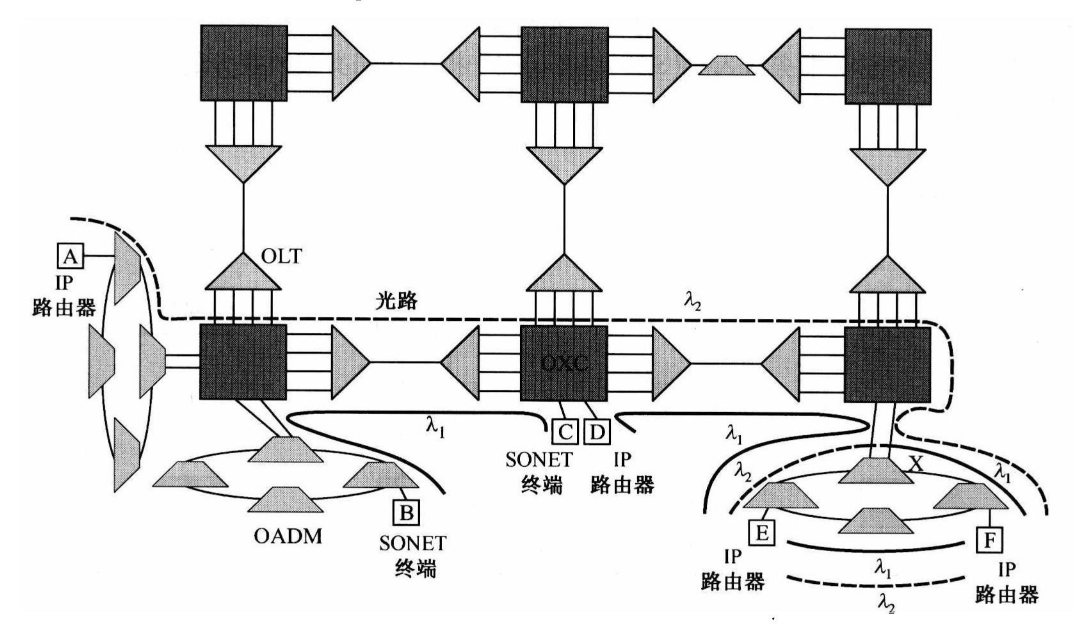


图 1.4　一个 WDM 波长路由网络，其中显示了光线路终端(OLT)、光分/插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)。该网络提供光路给使用者，它们通常是IP路由器或SONET终端

如图 1.4 所示，建立光网络的关键网络单元是光线路终端(OLT)、光分/插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)节点。一个 OLT 光线路终端将多个波长复用到一芯光纤和将一芯光纤中的一组波长分离到不同的光纤。OLT 常用在点至点的 WDM 链路的终端。一个光分/插复用器接收多波长信号，并选择其中部分波长下路，同时让其他波长直通。它还将一些本地波长有选择地加入到这些直通的波长中，共同组成输出信号。一个光分/插复用器有两个包含波分复用信号的线路端口，以及一些将单个波长下路和上路的本地端口。一个光交叉连接设备基本上具有与其类似的功能，但规模更大。OXC 有大量的端口(从几十个到几千个)，并且能将波长从一个输入端口交换至另一个端口。OADM 和 OXC 都可以有波长转换功能。这些网络的构造细节将在第 4 章中讨论。

具有上述结构的光网络已经在使用。OLT 设备已广泛应用于点至点的通信系统中。OADM 现已用于长途网与城域网中。OXC 正首先应用于长途网络中，因为这些网络有较大的容量。

1.4 光层

在深入钻研光层的细节前，首先介绍分层网络体系结构的概念。网络是具有各种不同功能的复杂整体，这些不同的功能由网络不同的设备完成，而这些设备是由不同厂商生产并将它们联网组合在一起的。为了简化对网络的看法，将网络的功能划分为不同的层是可取的，如图1.5所示。早在20世纪80年代初，就由国际标准化组织(ISO)提出了这种类型的分层模型。可以将这些层想象成垂直堆叠在一起。每一层执行一组特定的功能，并向相邻的较高层提供一组业务。反过来，每一层期望它下面的那一层给它传递一组特定的业务。两个相邻层之间的业务接口称为业务接入点(SAP)，在相应于提供不同类型的业务的层与层之间可能有多个业务接入点。

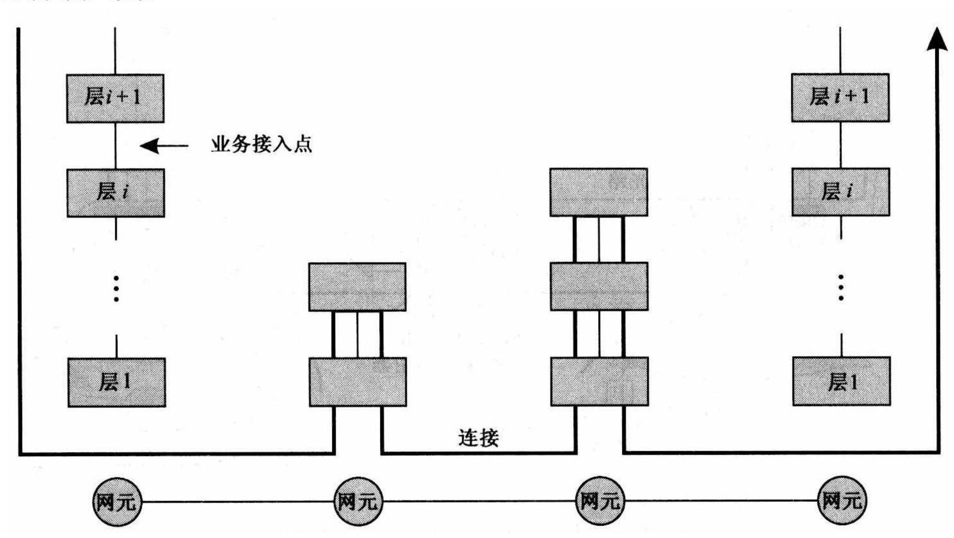


图1.5 表明在每个网元(NE)的层的网络分层体系

在大多数情况下，网络给用户提供连接。一条连接建立在源节点和宿节点之间。建立、拆除及管理连接状态是独立的网络控制和管理单元的职责(未在图1.5中示出)，该单元可以控制网络中的每个单独的层。还有一些例子是网络提供给用户无连接业务。这些业务适合用于传输短的报文，而没有建立和拆除这样连接的开销。下面只讨论面向连接的模式。

在网元内，属于一条连接的数据在层间流通。每一层复用一些较高层的连接，并可能将更多的开销加入到来自较高层的数据中。每个中间网元沿着一条连接路径包含了该分层结构中从最底层开始到某一层在内的一组层。

定义每一层的功能和各层之间的接口是重要的，因为这样就可以让厂商制造出各种执行某些层功能的硬件和软件产品，而无须实现所有层的功能，并提供适当的接口来与执行其他层功能的产品交流信息。

对每一层来说，有许多可能的实施方案和标准。一个给定的层可以与各种各样的较低或较高的层合作。我们将所研究的每一种不同类型的光网络都构成了一层。每个层本身又可以依次分解成几个子层。当研究这些网络时，会进一步探讨这个分层体系。

图 1.6 是由国际标准化组织(ISO)提出的网络不同层次的典型分类。层次结构中的最底层是物理层(physical layer)，它提供了一条具有一定带宽的"管道"与上面一层联系。物理层可能是光、无线、同轴电缆或双绞线电缆。第二层为数据链路层(data link layer)，它是负责将来自物理层的数据成帧、复用和解复用。成帧协议规定了数据是如何通过物理链路传输的。通常情况下，数据在物理链路上传输前被分成帧。这样做是必要的，可确保链路上的数据可靠地传输。成帧协议明确给出了两帧之间的界定，允许信号有足够的过渡期，以便它可以在另一端恢复，通常还包括额外的开销，使链接故障能被检测到。适合点至点链接的数据链路协议的例子包括以太网、点对点协议(PPP)和高级数据链路控制协议(HDLC)等。例如，以太网的数据链路协议也可以运行在一些链路上，由多个节点共享一条链路的共同带宽。这些协议有一个媒体访问控制层(MAC)，负责协调一条链路上不同节点之间的传输。该条链路成为所有节点的局域网。

数据链路层之上是网络层(network layer)。网络层通常为更高层次提供虚电路或数据报服务。一条虚电路(VC)表示一条端至端的连接，并具有特定的与之相关的一组服务质量(QoS)参数，如带宽和误码率。由源发送的数据通过 VC 顺次传至目的地。另一方面，数据报是无连接概念的端到端发送的一些短信息。网络层实现端到端的路由功能，将源端一条信息传递到它的宿端。现在绝大多数网络层是 IP，在 IP 网络中，主要网元是 IP 路由器。在分组交换网络中，IP 提供一种方法端到端地路由数据包(或数据报)。IP 包括统计复用多个分组数据包流，现在它还提供一些简单的、相对缓慢和效率低下的业务恢复机制。它的业务恢复机制也因提供 VC 业务的多协议标记交换(MPLS)协议而获得了增强。互联网协议已经适应了在各种数据链路和物理介质下工作，如以太网、串行电话线、同轴电缆和光纤等。在第 3 章中，将有关于这个问题的更多介绍。

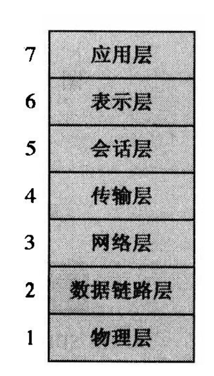


图 1.6　典型的分层结构

传输层(transport layer)是网络层的上一层，它负责确保端到端、有序和无误码传递已发送的消息。例如，互联网上使用的传输控制协议(TCP)就属于这一层。本书将不会关注传输层上面的其他几层，如会话层(session layer)、表示层(presentation layer)和应用层(application layer)等。

这幅典型的网络分层示意图需要一些修饰来处理各种网络和现在正在迅速激增的各种协议。目前，网络更现实的分层模型是将多协议栈一层层地叠起来。每个栈包含几个子层，这些子层可以提供与传统的物理层、链路层和网络层类似的功能。为了提供一个具体的例子，考虑如图 1.7 所示的在 SONET 网络上运行的 IP。在这种情况下，IP 网络将 SONET 网络视如在 IP 路由器之间提供了点至点一些链路。但是在 SONET 层本身内部实现的路由和交换连接，在一定意义上纳入了自己的链路层、物理层和网络层。

引入的第二代光网络又增加了另一所谓的光层到协议层次结构。光层是业务层，它给其他客户层提供业务。如图 1.8 所示，该光层给各种客户层提供光路。在第二代光网络层上面的客户层的例子包括 IP、以太网和 SONET/SDH，以及其他可能存在的协议，如光纤信道(用于将计算机与存储设备及其他计算机相互连接的一种协议)。随着第二代光网络的演进，它们也可提供除光路之外的其他业务，如分组交换虚电路或数据报业务。这些业务可以直接与

用户实际应用接口，如图 1.8 所示。也有可能存在其他几种层的组合，但没有在图中显示，如在光纤网上运行 SONET 网，再在 SONET 网上运行 IP 网。其中一些内容将在第 3 章中讨论。

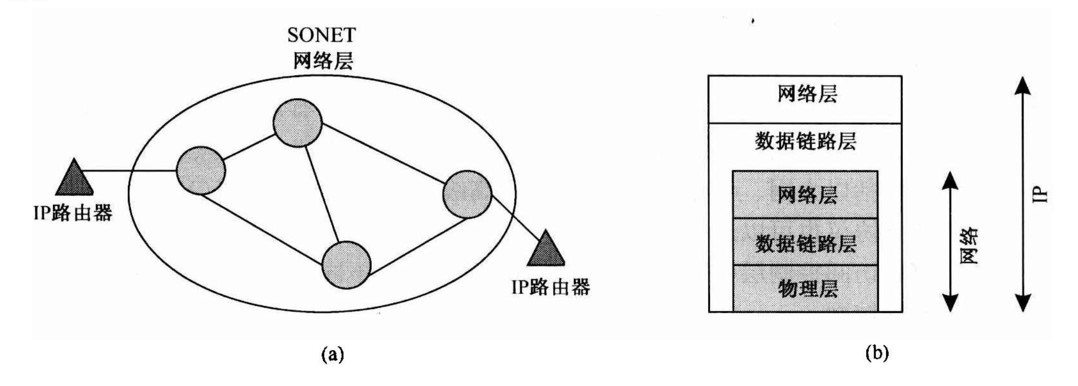


图 1.7 在 SONET 网络中运行的 IP。(a)该网络有 IP 交换机，它带有连接到SONET网络的SONET适配器；(b)该网络分层示意图

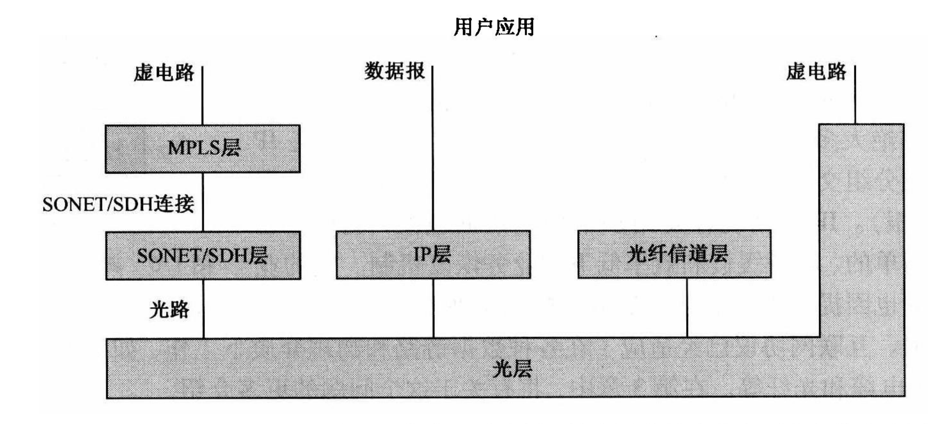


图 1.8 由第二代光网络层组成的网络分层示意图，该光层支持在它上面的各种客户层

客户层利用光层所提供的光路。对于运行在光层上面的 SONET、以太网或 IP 网络来说，光层只是简单替代了 SONET 终端或 IP 路由器之间的实际光纤连接。如前所述，一条光路是网络两个节点之间的一条连接，并通过在其路径上的每一条链路配置一个专用波长建立而成的。请注意，每一个波长很可能负载相当高的比特率数据(从几 Gb/s 到 10 Gb/s 范围内)，而这整个带宽通过光路提供给高层。根据网络的能力，该光路根据上层的需求建立或拆除。这可以被认为是一种电路交换业务，类似于今天的电话网络提供的业务：网络根据用户的需求来建立或拆除呼叫。此外，该网络也可以只提供网络配置时就已建立的永久光路。此光路业务支持各种交叠网络的高速连接。

光网络今天所提供的主要功能，从用户的角度来看可能被认为是属于物理层内的功能。然而，光网络本身包含几个子层，这几个子层依次对应于传统分层视图中链路层和网络层的功能。

在出现光层以前，SONET/SDH 在电信网络中是主要的传输层，现在它仍然是网络许多部分的主要层次。我们将在第 3 章中详细研究 SONET/SDH。为了方便起见，将在本节其余部分仍使用 SONET 术语。SONET 层提供了几种关键功能。它提供了端到端的、具有管理功

能的电路交换的连接，以及一种将低速率的连接复用成较高速率的连接的有效机制。例如，可将 64 kb/s 的低速语音连接或 1.5 Mb/s 的专线连接一直复用到 10 Gb/s 或 40 Gb/s 的线路速率，用于在网络上传输。此外，在中间节点 SONET，利用基于指针的、简练的复用机制可从高速流中提取出单个的低速流。

SONET 还提供了高度的网络可靠性和可用性。网络运营商希望他们的网络达到 99.99% 至 99.999% 的可用性。这些数字意味着允许的网络故障时间每年分别应在 1 h 和 5 min 之内。在网络出现故障时，SONET 可通过完善的快速业务恢复机制实现这个要求。这一问题将在第 6 章中探讨。

最后，SONET 包含了大量的用于监视和管理网络的开销。这些开销包括奇偶校验字节和连接标志。前者用来确定接收的帧是否有误，后者用来追踪和验证复杂网络中的连接。

SONET 网元包括线路终端、分/插复用器(ADM)、再生器和数字交叉连接设备(DCS)。线路终端复用和解复用业务流。ADM 配置在线型和环型网络结构中。它们提供了一种有效的方式下路节点中的部分业务，而让其余的业务直接通过该节点。在环形网络拓扑中，可以让业务流绕过网络中的故障重新路由。再生器可让 SONET 信号在需要时获得再生。DCS 被用在大型节点中，以交换大量的业务流。

光层履行的功能在许多方面类似于 SONET 层履行的功能。光层将多条光路复用入一单芯光纤，并允许在网络节点从组合的复用信号中有效地提取出各条光路。它采用完善的业务恢复技术和管理技术。这些技术将在第 5 章和第 6 章中讨论。

图 1.9 示意了一个典型的突出光层的网络分层机制。光层提供了由 SONET 和 IP 网元使用的光路。SONET 层将低速电路交换数据流复用至高速数据流，然后在光路上传输。IP 层将分组交换数据流统计复用至高速数据流，它们也在光路传输。光层内部本身就是一个复用层次结构。多波长或光路组合成波带。多个波带又被组合成一芯光纤中的复合波分复用信号。网络本身可能包含多芯光纤和多芯光纤束，每束又包含多条光纤。

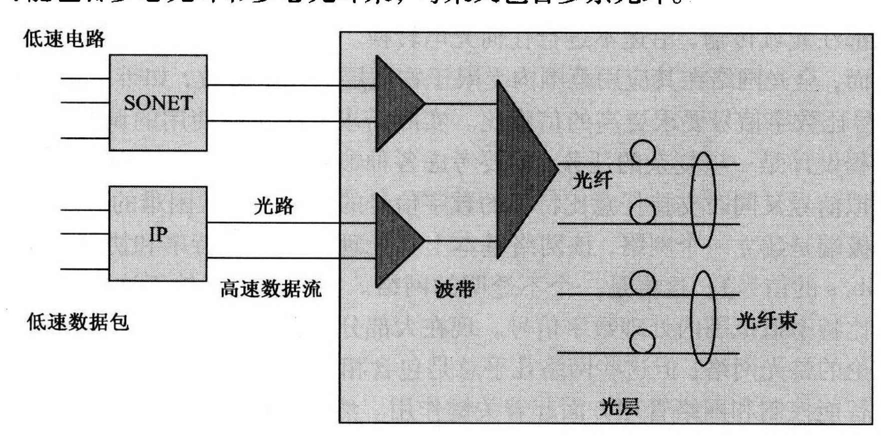


图 1.9　典型的网络分层机制的例子

因此，为什么在有类似功能网络中存在多个层呢？答案是这种分层方式大大降低了网络设备的成本。不同的层可以更有效地完成不同传输比特率下的功能。例如，SONET 层现在能够有效(即具有高的成本效益)交换和处理 10 Gb/s 传输比特率的数据流。然而，如果让该层来处理来自 WDM 链路的 100 条 10 Gb/s 的数据流，则是非常昂贵的。另一方面，光层在处理

基于波长粒度的数据流方面特别有效，但在处理如155 Mb/s的较低粒度的数据流方面就不是特别好。因此，利用光层在粗粒度上处理大数量带宽，而利用SONET层在细粒度上处理小数量带宽是有意义的。这种基本观点是利用多层次结构可以提供这样功能的关键驱动力，我们将在第4章中详细讨论这一点。

类似的观点也适用于这些网络的业务恢复功能。某些故障由光层处理较好，而其余一些故障由SONET层或IP层处理较好。这方面的问题将在第6章中讨论。

1.5 透明和全光网络

由第二代网络提供的光路服务的一个主要特点是，一旦光路建立，这类业务对经过该光路传输的实际数据是透明的。例如，某一特定的最大和最小比特率可能被指定，该业务可能会接收在此限定内的任何比特率，以及任何协议格式的数据。它也可能是模拟信号的数据。

网络中的透明性提供了几个优点。运营商可以利用单一的基础设施来提供各种不同的业务。可以认为，这就是业务透明性。其次，虽然网络中采用的协议或比特率改变了，但基础设施是不会过时的。整个网络中配置的设备无须进行彻底的改革仍可支持新的协议和/或比特率。这一特性允许在网络中迅速且有效地部署新业务的同时，也允许传统业务在网络中运行。

这类透明网络的一个例子是电话网。一旦一次呼叫在电话网中建立，在此呼叫过程中它就始终给用户提供4 kHz的带宽，用户可以用来发送不同类型的业务，如语音、数据和传真等。毫无疑问，现在的电话网络的透明性，已对我们的生活方式产生了深远的影响。透明性也已成为第二代光网络非常有用的特性。

与透明网络相关的另一个术语是全光网络(all-optical network)。全光网络的数据从源节点到宿节点都在光域传输，沿途不进行任何光电转换。在理想条件下，这样的网络将是完全透明的。然而，全光网络在其应用范围内受限于物理层的几个参数，如带宽和信噪比等。例如，模拟信号比数字信号要求更高的信噪比。实际需求取决于所使用的调制格式和比特率。物理层的工程设计是一项复杂的任务，需要考虑各种参数。基于这个原因，建造和运营一个既可支持模拟信号又同时支持任意比特率的数字信号的网络是非常困难的。

另一个极端是建立一个网络，该网络基本上只处理单一的比特率和协议(如只在SONET网传输10 Gb/s的信号)。这将是一个不透明的网络。实际的网络处于这两者之间，可以在指定的最大比特率值范围内处理数字信号。现在大部分正在使用的光网络属于这一类。

虽然谈论的是光网络，但这些网络几乎总是包含相当多的电子器件。首先，网络中电子器件在执行智能控制和网络管理方面起着关键作用。然而，即使在数据传输路径中，在大多数情况下网络边缘仍需要电子器件来适配进入光网络的信号。在许多情况下，因受物理层设计的限制，信号可能无法以光的形式一直传输到目的地，可能在到达目的地之前需要再生。在其他情况下，信号可能需要从一个波长转换成另一个波长。在所有这些情况下，信号通常是由光转化为电，然后再返回到光的形式。

在信号传输路径上的电子再生器降低了该条路径的透明度。数字数据共有三种类型的电子再生技术。标准的一种被称为具有定时与整形的再生，也被称为3R。这时，位时钟信号从

信号中提取，然后再给信号定时。这种技术基本上是每次再生时产生一个“新”的复制信号，并允许信号经过大量的再生器。然而，它消除了对比特率和帧协议的透明度，因为通常需要这两方面的信息来恢复时钟。通过使用可编程的时钟恢复芯片，可以获得一些有限形式的比特率透明度，这是由于这些芯片可以工作在相互成倍数的一组比特率下。

一种使光信号再生而不重新定时的方法，也称之为2R，提供比特率透明性。这种 2R 不支持模拟数据或不同的调制格式[GJR96]。但是，这种方法限制了再生的次数，特别是在超过每秒几百兆的高比特率时。该限制归因于抖动，在每一次再生时抖动都会累积。

电再生的最后一种形式是1R，这时的信号仅仅接收并转发而不再定时或整形。这种再生形式也可处理模拟数据，但其性能明显低于其他两种形式的再生。由于这个原因，现在正在运行的网络都使用2R 或3R 的电再生。请注意，现在光放大器正被广泛用于在光域放大信号，而无须转换成电信号。这些光放大器可以被看成是1R 的光再生器。

表 1.1 提供了不同维度透明性的概述。表的一端是一个工作在固定比特率和协议下的网络，如10 Gb/s 的 SONET 网。这是一个真正不透明的网络。表的另一端是一个完全透明的网络，将支持模拟信号和具有任意比特率和成帧协议的数字信号。正如早先指出过的那样，这样一个网络不是实际设计和商用的网络。现在，一个现实的备选方案是设计支持各种数字信号的网络，比特率可达到预定的最大值，并可使用一套特定的成帧协议，如 SONET 网和 10 Gb/s以太网。该网络支持各种帧协议，不管是在网络内部使用 2R，还是对每一种成帧协议提供指定的 3R 适配设备。这样一个网络如图 1.10 所示。它可以被看成由多个边界上带有供适配、再生和波长变换用的光-电-光转换器的全光子网络岛组成。

表 1.1　光网络中不同类型的透明性

参　数	透明类型		
	全　透　明	实　际　中	不　透　明
模拟/数字	二者都是	数字	数字
比特率	任意	预先确定最大值	固定
成帧协议	任意	有选择的几种	一种

图 1.10　由光-电-光(OEO)转换器互连全光子网的光网络。网络中 OEO 转换器用于将外部信号再生和进行波长转换后将外部信号适配进入光网络

1.6 光分组交换

迄今为止，已经讨论过提供光路的光网络。这些网络基本上是电路交换网络。研究人员还在开发在光域可以完成数据包交换的光网络。这种网络将能够像 IP 和 MPLS 网络那样提供虚电路业务或数据报业务。采用虚拟电路连接方式，这些网络看起来好像提供了两个节点之间电路交换连接。然而，这种连接所提供的带宽可能比一条链路或波长上所能提供的全部带宽小。例如，在未来高速网络上的各个连接可能会工作在 10 Gb/s，而一个波长上传输比特率可能达到 100 Gb/s。因此，网络必须采用一些时分复用的方法，将多个连接复用到这个传输比特率上。在这种高比特率上采用光域复用方法，可能比采用电域复用方法实现起来更容易。这种光时分复用(OTDM)的形式可以是固定的或统计的。那些采用统计复用的网络被称为光分组交换网络。为了简化起见，将主要讨论光分组交换。固定的 OTDM 可以看成是一种光分组交换的子集，其复用形式是固定的，而不是统计的。

图 1.11 表示了一个光分组交换节点，其想法是创建比电分组交换预想的容量大得多的分组交换节点。这样，一个节点接收一个进入的分组，读取它的分组包头，并切换它到适当的输出端口。节点可以强加给该分组包一个新的分组包头。它也必须处理输出端口出现的竞争。如果两个来自不同端口的分组数据包需要输出到同一个输出端口，则其中一个数据包必须被缓存或送至其他输出端口。

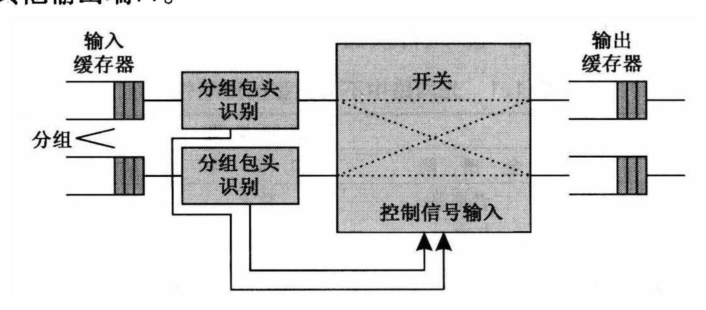


图 1.11　光分组交换节点。对于节点缓冲输入的数据包，查看分组包头，并根据包头中的信息将数据包路由至适当的输出端口

理想的情况下，节点内部所有功能应在光域中完成，但在实际中，某些如处理包头和控制开关等功能不得不在电域进行，这是因为光域处理能力非常有限。分组包头本身的比特率可以比数据传输比特率低，以便它能够在电域进行处理。

光分组交换的使命是在电分组交换不能实现的比特率下完成分组交换。但设计师们受到了在光域处理信号方面的几个限制的影响。其中一个重要因素是缺乏用于缓冲的光随机存储器。光缓冲器是利用一定长度的光纤线来制作，且只是一些简单的延迟线，而不是全功能存储器。分组交换包括大量智能实时软件和专用硬件来控制网络，并提供服务质量保证。这些功能是难以在光域实现的。另一个因素是快速光交换技术相对于电产品来讲还处于相当原始的状态。由于这些原因，虽然光分组交换网络方面的许多技术已经在实验室中被证实了，但光分组交换还不能够用于商业。有关这方面的内容将在第 9 章中详细介绍。

1.7　传输基础知识

在本节中，将介绍和定义与光通信系统相关的常用参数的单位。

1.7.1　波长，频率和信道间隔

当谈到 WDM 信号时，就是在谈这些信号的波长或频率。波长λ和频率f的关系如下：

$$c = f\lambda$$

其中，c代表真空中的光速，即3×10^8 m/s。相对于真空的所有参数将给定。事实上，光纤中的光速稍微有点低(接近2×10^8 m/s)，并且波长也相应不同。

为了表征 WDM 信号，既可以使用信号的频率，也可以使用信号的波长。波长的单位是纳米(nm)或微米(μm)。1 nm = 10^{-9} m，1 μm = 10^{-6} m。光纤通信使用的中心波长在 0.8 μm、1.3 μm 和 1.55 μm 左右。这些波长处于红外波段，人的眼睛是看不见的。频率单位是赫兹(Hz 或周期/s)，更典型的单位是兆赫兹(1 MHz = 10^6 Hz)、吉赫兹(1 GHz = 10^9 Hz)或太赫兹(1 THz = 10^{12} Hz)。利用$c = 3 \times 10^8$m/s 可知，1.55 μm 的波长相应于频率约 193 THz，即193×10^{12} Hz。

另一个感兴趣的参数是信道间距，这是 WDM 系统中两个波长之间或频率之间的间距。信道间距也可以用波长或频率的单位量度。两者之间的关系可从下列方程得到：

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

在中心波长λ_0对该方程求微分，可以得到频率间距Δf和波长间距$\Delta\lambda$的关系：

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda_0^2}\Delta\lambda$$

只要波长(或频率)的间距比实际信道波长(或频率)小，这种关系是准确的，这通常是在光通信系统中的情况下。在波长λ_0 = 1550 nm 时，0.8 nm 波长间距相应于 100 GHz 的频率间距，这是 WDM 系统中典型的间距值。

时域数字信息信号可以被看成一个脉冲周期序列，根据数据是 1 还是 0，确定有脉冲信号或无脉冲信号。比特率只是这一周期的倒数。这些信号在频域有等价的表示法，信号的能量分布在一组频率上。这种表示法被称为功率谱，简称为谱。信号带宽是信号频谱宽度的量度。带宽同样可以在频域或波长域量度，但主要是用频率的单位量度。请注意，一直使用的带宽这个术语相当不严谨。数字信号的带宽与比特率有关，但不完全相同。带宽通常用 kHz 或 MHz 或 GHz 表示，而比特率用 kb/s，Mb/s 或 Gb/s 表示。两者之间的关系取决于所使用的调制类型。例如，一条电话线提供 4 kHz 的带宽，但成熟的调制技术使我们能够在这条电话线上实现 56 kb/s 的比特率。比特率与可用带宽之比被称为频谱效率。光通信系统使用相当简单的调制技术，达到约 0.4 bits/s/Hz 的频谱效率，因此，10 Gb/s 比特率的信号占用约 25 GHz的带宽是一种合理的假设。请注意，信号带宽比信道间距要足够小，否则存在相邻信道的干扰和信号失真。

1.7.2　波长标准

现在 WDM 系统主要使用 1.55 μm 波长区域的主要原因有两个：在该波长区域光纤中的

固有损耗是最低的，以及在该波长区域有性能优良的光放大器。在后面的章节中，还将对此进行详细讨论。WDM 系统中使用的波长和频率已经根据国际电信联盟(ITU)的频率栅格标准化了。这是一个中心频率在 193.1 THz 的无限栅格，图 1.12 所示的频率栅格是其中一段。国际电信联盟决定基于 50 GHz 或 100 GHz 等信道间距在频域规范该栅格。请注意，如果多信道之间按波长选定等信道间距，则信道间距在频率上就不是精确的等间距了，反之亦然。图 1.12 还以承载业务信号的栅格方式显示了间距为 400 GHz 的两个信道的功率谱，表明了那些信道中信号带宽的增加。

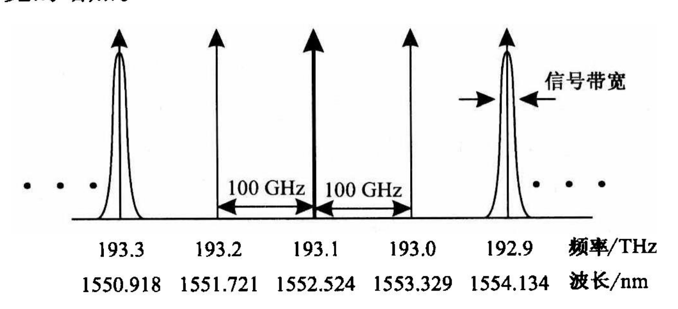


图 1.12 基于基准频率 193.1 THz 的国际电联 100 GHz 间距的频率栅格。间距为50 GHz频率栅格也被定义在同一基准频率

国际电信联盟栅格只是信道间距的一个方面。现在，正在看到使用 25 GHz 的信道间距的系统，也看到了几个传输频段的应用。早期的波分复用系统中使用了所谓的 C 波段，或称为传统波段(约 1530 ~ 1565 nm)。L 波段或长波长波段(约 1565 ~ 1625 nm)的应用随着该波段光放大器的开发，最近已变成切实可行的了。这个波段及其他的波段将在 1.8 节讨论。

在更具体的波长标准方面，已经证明很难从不同的 WDM 供应商和服务提供商那里获得一致结果。设计波分复用传输系统是一项复杂的工作，需要权衡许多不同的参数，包括在系统中使用的特定波长。不同的 WDM 供应商使用不同的方法来优化其系统设计，这样导致在波长规划方面取得一致变得困难。

因此，国际电联的波长栅格标准有助于加快波分复用系统的应用，因为器件供应商可以将波长可选择性的器件研制成符合特定的波长栅格，这明显地有助于库存管理和生产。

1.7.3 光功率和损耗

在光通信领域使用分贝单位(dB)而不是传统单位来度量功率和信号电平是很常见的。这样做的原因是系统中的功率变化超过几个数量级，因而用对数量度比用线性量度更容易处理。此外，这样做可使常规计算中涉及乘法的运算变成使用分贝的加法运算。分贝单位常用来表示相对和绝对的值。

为了理解这点，考虑一条光纤链路。假设发送一个功率为 P_tW(瓦)的光信号，如果用 dB 为单位，则有

$$(P_t)_{dBW} = 10\log(P_t)_W$$

在许多情况下，用 mW(毫瓦)来度量功率更为方便，因此有一个等价的 dBm 值可由下式给出：

$$(P_t)_{dBm} = 10\log(P_t)_{mW}$$

例如，1 mW 的功率相应于 0 dBm 或 -30 dBW。10 mW 的功率相应于 10 dBm 或 -20 dBW。

由于光信号通过光纤传输，它是衰减的，也就是说，它的功率在降低。在链路的另一端，假设接收功率是 P_r。链路损耗 γ 被定义为

$$\gamma = \frac{P_r}{P_t}$$

如果以 dB 为单位，则有

$$(\gamma)_{dB} = 10\log\gamma = (P_r)_{dBm} - (P_t)_{dBm}$$

请注意，分贝常用来表示相对值，而 dBm 和 dBW 用来表示绝对功率值。作为一个例子，如果 $P_t = 1$ mW 和 $P_r = 1\ \mu$W，这意味着 $\gamma = 0.001$，将有等值的

$$(P_t)_{dBm} = 0\text{ dBm 或 } -30\text{ dBW}$$

$$(P_r)_{dBm} = -30\text{ dBm 或 } -60\text{ dBW}$$

以及

$$(\gamma)_{dB} = -30\text{ dB}$$

在这种情况下，信号被减弱到了千分之一等价于有 30 dB 的损失。一个信号被放大了一千倍等价于有 30 dB 的增益。

通常，用 dB/km 单位来衡量光纤损耗。例如，若光信号在衰减为 0.25 dB/km 的光纤中传输了 120 km，则光信号将衰减 30 dB。

1.8 网络演进

通过概述已经形成光纤通信系统和网络演化的发展趋势和因素来结束这一章。图 1.13 给出了一个概述。光纤传输历史是关于如何在尽可能长的距离上和以最高的容量传输数据的历史，在这方面取得的进步是非常引人注目的。同样引人注目的是研究人员在光纤通信方面已经成功地克服了重重障碍，其中许多障碍在刚发现时似乎阻碍容量和传输距离的进一步增长。最终的研究结果是，网络中的容量在持续增长，而同时每千米传输每比特的成本持续降低，已到了运营商将传输线路的定价不依赖距离的阶段。

1.8 节会介绍各种光纤及光器件的传输损伤。部分内容将在第 2 章中详细讨论。

1.8.1 早期——多模光纤

20 世纪 60 年代中期的早期实验表明，光信号的编码信息可以在玻璃纤维波导中传输。波导提供了一种可以引导光信号的媒介，使之不分散而聚集传输一段合理的距离。这使信号在另一端具有足够的强度被接收，因而信息能被解码。这些早期的实验证明，光在光纤中传输是可行的。

光纤是一种非常细的圆柱形玻璃波导，其中包括两个组成部分：内部的纤芯材料和外包层材料。纤芯和包层都设计得使光信号保持在光纤中传输，并在信号质量恶化前传输适当的长距离。

直到 20 世纪 70 年代初发明低损耗光纤，光纤传输系统才真正获得飞跃发展。这种硅基

光纤的三个低损耗窗口在红外波段的0.8 μm、1.3 μm和1.55 μm处。在1.55 μm波段和1.3 μm波段的最低损耗分别约为0.25 dB/km和0.5 dB/km。这些光纤使光信号在需要再生之前的传输距离超过了几十千米。再生器将光信号转换为电信号，再重发一个原数据信号的最新副本作为新的光信号。

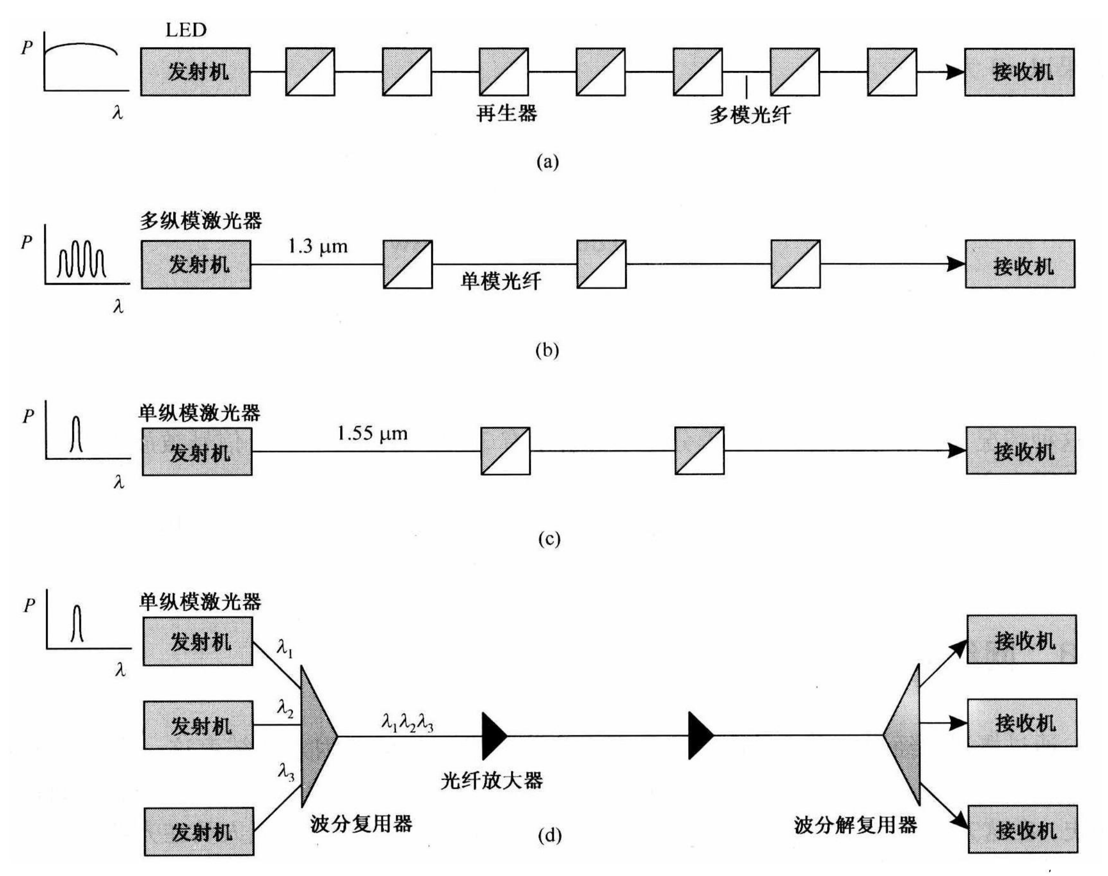


图1.13 光纤传输系统的演变。(a)采用LED在多模光纤中传输的早期系统;(b)为了克服多模光纤中模间色散而采用1.3 μm波段的多纵模(MLM)激光器在单模光纤中传输的系统;(c)采用低损耗的1.55 μm波段和用以克服色度色散限制的单纵模(SLM)激光器的稍后的传输系统;(d)采用1.55 μm波段多波长和用光放大器取代传统中继器的当前一代WDM传输系统。发射机左侧的P-λ曲线表示发射信号的功率谱

早期的光纤是所谓的多模光纤。多模光纤的纤芯直径大约是50 μm至85 μm。这一直径比光信号的工作波长要长。光在这些光纤中的传输可以用如图1.14所示的几何光学模型解释。在此模型中，光线在纤芯中的纤芯和包层边界上来回反射。信号包含多束光线，每束光线可能经过不同的路径通过光纤。这些不同的路径的每一条都对应一种传播模式。如图1.14所示，不同路径的长度是不同的。因此，每种模式与其他模式相比，具有略微不同的传输速率。

实现光纤传输所需的其他关键器件是光源和接收器。紧凑型半导体激光器和发光二极管(LED)装备了实用的光源。这些激光器和发光二极管采用快速通断的有光和无光两种状态来实现传输数字(二进制)数据。半导体光电探测器能够实现将光信号转换回到电信号。

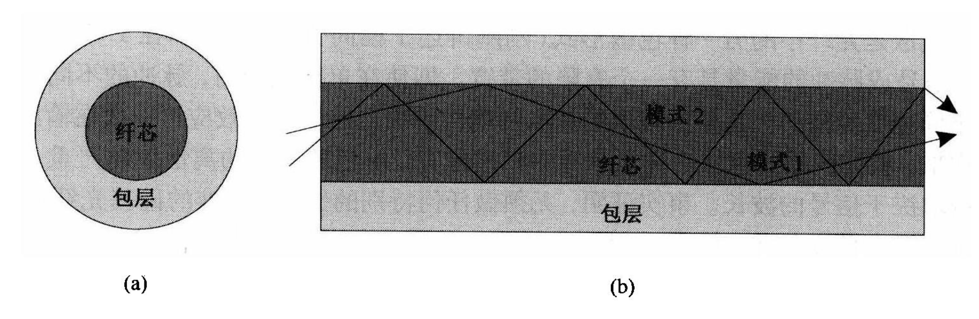


图 1.14　光在光纤中传输的几何光学模型。(a)光纤的横截面，该光纤由纤芯和包层组成，纤芯的折射率略高于包层的折射率；(b)光纤的纵视图，纤芯中的光线在纤芯和包层的边界上产生全反射而折回纤芯中

早期的通信系统(20 世纪 70 年代末期到 80 年代初期)除了使用 0.8 μm 和 1.3 μm 波段的发光二极管或半导体激光器发射机外，还使用了多模光纤。发光二极管是相对低功率的器件，而且发出的光的光谱相当宽，从几纳米到几十纳米的范围。激光器比发光二极管有较高的输出功率，因此信号再生之前可传输较长的距离。早期的激光器是多纵模(MLM)法布里-珀罗(Fabry-Perot)激光器。这些多纵模激光器发出的光的光谱相当宽，从几纳米到几十纳米。实际光谱包含多条光谱线，这些不同的光谱线可以被看成是不同的纵模，因此称为多纵模(MLM)。请注意，这些纵向激光器模式不同于光纤内的传输模式！虽然发光二极管和多纵模激光器发出的光都有很宽的光谱，但发光二极管的光谱是连续的，而多纵模激光器的光谱由许多周期性谱线组成。

这些早期的系统必须有再生器，以便每隔几千米就再生信号。再生器是一种昂贵的设备，直至今天仍然是昂贵的，所以就迫切希望增加再生器之间的传输距离。在这种情况下，限制传输距离的主要原因是称之为模间色散的现象。正如前面所说，在多模光纤内脉冲能量通过不同的模式传输，而每个不同的模式具有不同的传输速度。因此，不同模式到达光纤末端的时间略有不同，这就导致脉冲离散。这种离散一般称为色散，现在这种由不同模式的不同速度产生的特定的色散称为模间色散。通常，这些早期的系统工作在 32 ~ 140 Mb/s 比特率范围，并且每 10 千米放置一个再生器。现在，这样的系统还用于一些低成本的计算机互连上，其比特率为每秒几百兆比特，传输几千米的距离。

1.8.2 单模光纤

为了消除模间色散，1984 年左右开始运行的下一代系统采用了单模光纤，并使用了 1.3 μm波段多纵模法布里 - 珀罗激光器。单模光纤有相对较小的纤芯直径，大约为 8 μm 至 10 μm，该直径只比光信号的工作波长范围大不了多少倍。这样就可以集中光信号的所有能量以单一模式在光纤中传输。使用单模光纤有效地消除了模间色散，并使比特率和再生器之间的距离大幅增加。这些系统再生器之间的间距通常在 40 千米左右，并工作在每秒几百兆比特的传输比特率上。这时，再生器之间的间距限制主要是光纤损耗。

在 20 世纪 80 年代后期，光纤通信发展的下一步是采用了 1.55 μm 波段的系统。相对于 1.3 μm 波段来说，这一波段具有更低的传输损耗，从而使得再生器之间的跨距更长。此时期另一传输损伤即色度色散(通常简称色散)，就增加传输比特率而言，开始成为一种限制因

素。色度色散是光纤中的另一种色散形式(刚刚讲述了模间分散)。正如在1.7节中看到的那样，光信号或脉冲的能量具有一个有限的带宽。即使在单模光纤内，脉冲的不同频率分量也是以不同速度传播的。这是由玻璃的基本物理性质决定的。这种效应再一次在输出端导致了脉冲离散，就如同模间色散一样。脉冲的频谱越宽，由色散引起的离散就越严重。在光纤中的色散取决于信号的波长。事实证明，无须做任何特别的努力，标准的硅基光纤在1.3 μm波段基本上没有色度色散，但在1.55 μm波段却有明显的色散。因此，色度色散在早期的1.3 μm系统中不是一个问题。

1.55 μm波段的高色度色散刺激了色散位移光纤的发展。色散位移光纤是经过精心设计的、在1.55 μm波段具有零色散值的光纤，因此不必担心在此波段的色度色散问题。然而，那时已经大规模地安装了标准单模光纤，此解决方案不适用于这种情况。一些运营商，特别是日本NTT公司和美国MCI公司(现为Verizon通信公司的一部分)确实安装了色散位移光纤。

那时，在继续使用标准光纤的同时，研究人员开始想办法寻找克服色度色散的方法。起作用的主要技术是减小传送脉冲的谱宽度。正如前面看到的，传送脉冲的频谱越宽，由色度色散引起的离散现象越严重。传送脉冲的带宽至少等于其调制带宽。不仅如此，带宽可能完全由所用的发射机的光谱宽度决定。正如前面所说，多纵模法布里-珀罗激光器的光谱相当宽，约几纳米(大约数百吉赫兹)，远远超过了信号本身的调制带宽。如果减小传送脉冲的频谱宽度，使其接近于调制频谱带宽，则由于色度色散引起的代价将大大降低。这促进了具有窄光谱宽度的分布式反馈(DFB)激光器的发展。DFB激光器是一种单纵模(SLM)激光器。与多纵模激光器含有许多谱线相比，单纵模激光器发射一条窄谱线的单波长信号。这一技术的突破刺激了比特率进一步提高到超过1 Gb/s。

1.8.3 光纤放大器和波分复用技术

光纤传输系统发展过程中的下一个重要里程碑是在20世纪80年代末到90年代初掺铒光纤放大器(EDFA)的开发。掺铒光纤放大器主要包含了一条掺有稀土元素铒的光纤，通常是几米到几十米长。由泵浦源将光纤中的铒原子从基态跃迁到更高能级的激发态。输入信号中的光子又触发这些原子使之回到它的基态。在此过程中，每个原子发射出一个光子。因此，输入信号光子触发了额外光子的发射，从而导致了光放大。由于铒元素的独有性质，铒原子态的能级差恰好与光纤1.5 μm低损耗波段一致。选择比信号波长低的激光器作为泵浦激光器进行泵浦，因为较低波长的光子具有更高的能量，而能量只能从较高能量的光子转移到能量较低的光子。掺铒光纤放大器的概念早在20世纪60年代就已提出了，但直到20世纪80年代末和90年代初，在可靠的高功率半导体泵浦激光器研制成功后才成为商用产品。

掺铒光纤放大器的出现推动了完全新一代系统的开发。掺铒光纤放大器的一个主要优点是可以同时放大许多波长的信号。这使得除了可以用提高传输比特率的方法外，还可以采用另外一种方式提高系统的容量，即波分复用(WDM)方法。该方法可以在一芯光纤中传输多个波长，而每波长传输的比特率保持不变。掺铒光纤放大器也许是发展波分复用系统的一个最大的促进因素。WDM和掺铒光纤放大器的利用使长距离传输系统的容量得到极大的提高，而成本却大幅下降。在每一个放置再生中继器的位置上，一个光放大器可以取代每光纤一个的昂贵的系列再生器。引人注目的是，现在几乎每一个长途运营商都已广泛采用光放大

的 WDM 系统。此外，相对于花几个月到几年时间才能敷设好的新光纤来说，波分复用系统能提供快速扩容能力。在 20 世纪 90 年代中期才开始采用带有掺铒光纤放大器的波分复用系统，现在就实现了每芯光纤超过 1 Tb/s 的传输容量。同时，一个信道的传输比特率也已经提升到 10 Gb/s。在最早期的 WDM 系统中，AT&T 公司 1995 年实现了 4 波长长途通信系统，以及 IBM 公司 1994 年实现了 20 波长 MuxMaster 城域系统。

随着掺铒光纤放大器的利用，色度色散问题再次提到我们面前。由于光纤放大器的使用，信号不再是每隔 40 ~ 80 km 再生一次，而可传输更长的距离。但由色度色散引起的脉冲离散现象越来越严重。同样，研究人员发现了一些技术，可处理色度色散问题。如果使用外部器件使激光器的输出光接通或断开（被称为外调制），而不是直接打开或关闭激光器（被称为直接调制），则发射的频谱可以进一步降低。随着带有外调制器的 DFB 激光器和掺铒光纤放大器的使用，光纤传输系统在 1.55 μm 波段、2.5 Gb/s 传输比特率情况下，在两个再生器之间的标准单模光纤上实现了传输约 600 km 的距离。当传输比特率为 10 Gb/s 时，传输距离要小得多。

下一个合乎逻辑的发明是色度色散补偿技术。已开发了各种色散补偿器，以补偿由光纤引入的色度色散，使总的残留色散减小到可控制的范围内。这些技术已使商业系统在每信道高达 10 Gb/s 传输比特率上、在两个再生器之间实现了数千千米距离的传输。

与此同时，其他早期曾是二阶或三阶效应的其他一些损伤开始像一阶效应一样出现，成为光纤通信系统发展的障碍。如今，这些障碍包括光纤非线性效应、掺铒光纤放大器的不平坦增益谱、各种偏振相关的效应等。光纤中存在几种非线性效应。其中之一是所谓的四波混频（FWM）。在四波混频现象中，三个不同波长的光信号在光纤中相互作用，产生了一个可能与这些光信号波长重叠的第四个光信号。可以料想，这个信号干扰了正在该波长上传输的实际数据。但出人意料的结果是，色度色散越高，光纤非线性效应作用就越低。色度色散使得不同波长的光信号在光纤中以不同的速度传输。反过来，则导致这些信号之间更少重叠，信号彼此相位失配，从而减小了四波混频非线性的影响。

实现色度色散和光纤非线性之间的均衡刺激了各种新型单模光纤的开发，以便控制这两种效应之间的相互作用。这些光纤的色度色散比常规光纤小，而同时也减小了非线性效应。

现在，可以看到高容量光放大的 Tb/s 级 WDM 光纤通信系统的发展。这些系统有数百个 10 Gb/s 信道，信道之间的间隔低至 50 GHz，而电中继之间的距离延伸至几千千米。工作在 40 Gb/s 信道速率的系统也在实验室中进行研究。毫无疑问，这些系统不久就会成为商用产品。与此同时，最近也报道了一些 Tb/s 级容量和中继器之间距离延伸至几千千米的实验系统[Cai01, Bak01, VPM01]，以及在较短的距离上传输超过 10 Tb/s 总容量[Fuk01, Big01]的传输系统。

表 1.2 表明了单模光纤中可用的不同传输波段。早期的波分复用系统中使用 C 波段，主要是因为该波段有掺铒光纤放大器。现在有了 L 波段的掺铒光纤放大器，可以使 WDM 系统使用 C 和 L 两个波段。还有其他一些光放大类型[如拉曼（Raman）放大，这将在第 2 章中讨论]，可与掺铒光纤放大器互补使用，并期待用其将其他光纤波段开发于 WDM 系统中，如 S 波段和 U 波段。同时，新光纤类型的发展也打开了称之为 E 波段的一个新窗口。这个波段原先不能用，因为在该波段内光纤是高损耗的。已开发出来的新型光纤减小了这些波长范围内的损耗。但是，仍然没有工作在这个波段范围内的适当的光放大器，所以 E 波段以短距离传输应用为主。

表 1.2 光纤中的不同波段。波长范围是近似的，还没有标准化

波 段	描 述	波长范围/nm
O 波段	原有	1260 ~ 1360
E 波段	扩展	1360 ~ 1460
S 波段	短波长	1460 ~ 1530
C 波段	常规	1530 ~ 1565
L 波段	长波长	1565 ~ 1625
U 波段	超长波长	1625 ~ 1675

1.8.4 从传输链路到光网络

20 世纪 80 年代后期，有事实表明已出现各种第一代光网络。在数据通信领域看到了城域网的开发，如 100 Mb/s 的光纤分布式数据接口(FDDI)，以及与大型计算机主机互连的网络，如 200 Mb/s 的企业串行连接(ESCON)。现在可看到使用光纤信道(FC)标准的存储网络正在迅速增长，它以几 Gb/s 的传输速率进行着各种类似的应用。在电信领域，可看到 SONET 正在开始标准化和在北美得到大规模应用，以及与其类似的 SDH 网络在欧洲及日本也得到大规模应用。所有这些网络现在都被广泛地应用。现在在其他各种设备上，如 IP 路由器和以太网交换机上装有高速光接口是司空见惯的事了。

由于这些第一代网络建立在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初，因此之后人们开始思考不仅仅将光纤用于传输的创新的网络架构。早期的实验研究大多集中于局域网方面应用的光网络，但这些应用技术的高成本阻碍了这种网络商业应用的可行性。光分组交换网和局域网方面的研究活动一直持续到今天。与此同时，波长路由网络成为 20 世纪 90 年代初一些研究人员一个重点研究的领域，因为人们意识到引入光层的优点。光分/插复用器和交叉连接器现在已成商用产品，并开始被引入到电信网络，这是因为受到了在光层高容量的交换和路由连接比在电层更经济的刺激。与此同时，光层逐渐发展到可提供更多的功能，包括能够动态建立和拆除跨越网络的光路，并有能力在网络产生故障的情况下迅速将光路重新路由。这些因素导致了智能光环网和网状网的产生，这些网络能按需提供光路，并结合内置的恢复能力处理网络故障。

在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初，还做出了很大努力以推广光纤到户(FTTH)这个概念及其多个变种，如光纤到路边(FTTC)等。这个概念的问题是基础设施的成本高和客户不愿意为视频到家等许多新业务付费，从而造成投资回报的问题。然而，随着互联网接入和视频点播等宽带业务需求的增加及因此导致电信管制的放松，促进了主要运营商开发现在这样的网络。电信运营商和有线电视运营商都在将光纤深入应用到接入网中，使之更接近终端用户。需要非常高容量的大企业正在由基于光纤的 SONET/SDH 或以太网提供服务，而无源光网络正作为可供选择方案为家庭和小型企业提供高速服务。这是在第 8 章中将要讨论的主题。

总结

本章首先描述了面对不断变化的电信业——流量需求大量增加、数据业务相对于语音的增加、电信行业管制的放松，导致了新的一系列运营商及为这些运营商提供设备的设备供应商的出现，对新的和灵活的业务类型的需求，以及支持所有这一切的基础设施等。

在这一章中，还描述了两代光网络：第一代网络和第二代网络。第一代网络使用光纤取

代铜电缆，以获得更高的容量。第二代网络通过网络内部的波长路由和交换来提供电路交换的光路。实现这些功能的关键单元是光线路终端(OLT)、光分/插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)。光分组交换还在不断开发，但面临着一些技术障碍。

可以看到两种互补的增加传输容量的方法：在光纤中使用更多的波长(WDM)和增加传输比特率(TDM)。同时，还追溯了光纤传输和成网的历史沿革。值得注意的是，我们仍然远没有达到光纤容量的基本限制。尽管前进的道路上有一些障碍，但毫无疑问，将看到使容量越来越高的新技术的发明，以及不断增强功能的光网络的应用。

进一步阅读材料

这些天来不断有来自商业媒体的有关通信重大变革的报道。许多期刊和杂志的专刊也一直关注于光网络及其使能技术[ACHG+08, KLW06, GLM+00, CSH00, DYJ00, DL00, Alf99, HSS98, CHK+96, FGO+96, HD97, Bar96, NO94, KLHN93, CNW90, Pru89, Bra89]。

一些会议涵盖光网络。主要是 Optical Fiber Communication Conference(OFC)、Supercomm 和 National Fiber-Optic Engineers' Conference。其他一些会议，如 Next-Generation Networks (NGN)、Networld-Interop、European Conference on Optical Communication (ECOC)、IEEE Infocom 和 the IEEE's International Conference on Communication (ICC)也涉及光网络方面。一些学术期刊，如 IEEE 的 *Journal of Lightwave Technology*、*Journal of Selected Areas in Communication*、*Journal of Quantum Electronics*、*Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*、*Transactions on Networking* 和 *Photonics Technology Letters*，以及诸如 *IEEE Communications Magazine* 都良好覆盖了光网络方面的研究内容。

有一些优秀的专著介绍了光纤传输和元件，所涉及的内容从相当基础的[Hec98, ST91]到非常先进的[KK97a, KK97b, Agr97, Agr95, MK88, Lin89]。Green 于 1993 年出版一书[Gre93]，专门描述了 WDM 器件、传输和网络方面的内容。

本书有关传输系统历史演变的描述也在其他一些书籍中有更详细的介绍。文献[Hec99]是一本易于阅读的书，主要介绍了光纤光学的早期历史。文献[Wil00]是一本特刊，刊登了许多光学研究先驱者们撰写的文章，包括多种激光器、光纤光学、其他元件和传输技术的概述和历史的观点。文献[AKW00, Gla00, BKLW00]虽然以贝尔实验室为中心，但对光纤技术和系统，以及导致目前这一代波分复用技术及系统的历史演变做出了优秀的概述。另外，还可参见文献[MK88, Lin89]。

高锟和 Hockham[KH66]是最早提出将低损耗的玻璃纤维用于光通信的科学家。现在有关低损耗光纤制作过程的首次报道见文献[KKM70]，以及精制过程见文献[Mac74]。文献[Sta83, CS83, MT83, Ish83]描述了一些早期地面光纤传输系统。文献[RT84]介绍了早期海底光纤传输系统之一。文献[KM98]可以看到最近的一份概述。

在单芯光纤上传输超过 1 Tb/s 的实验报告首次在 1996 年的光纤通信会议(OFC)上报道，而且数字还在不断提高。请参见[CT98, Ona96, Gna96, Mor96, Yan96]等文献。相关的研究工作主要是：(1)越洋传输 Tb/s 总流量，每波长传输比特率是 10 Gb/s 或 20 Gb/s[Cai01, Bak01, VPM01]，或每波长 40 Gb/s 的传输比特率，但传输距离较短[Zhu01]；(2)超过10 Tb/s的总流量，每波长传输比特率是 40 Gb/s，传输距离超过几百千米[Fuk01, Big01]。

数年来，多种资源已报道了网络流量的增长率。一个对增长率进行了估计并参考了其他资源的网站是美国明尼苏达互联网流量研究所(MINTS)，可见 www. dtc. umn. edu/mints/。

最后，虽然在本章没有谈及标准，但将在第 3 章、第 5 章和第 6 章中进行讨论。各种致力于光网络标准的机构包括国际电信联盟(ITU)、美国国家标准学会(ANSI)、光互联网论坛(OIF)、互联网工程任务组(IETF)、电气电子工程师学会(IEEE)和卓讯科技(Telcordia Technologies)。附录 C 提供了相关标准文件的清单。

参考文献

[ACHG+08] R. Alferness, C. Chang-Hasnain, C. Giallorenzi, D. Keck, and A. Willner, editors. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology: Special Issue on Celebrating 25 Years of the IEEE/OSA*, volume 26, May 2008.

[Agr95] G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd edition. Academic Press, San Diego, CA, 1995.

[Agr97] G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley, New York, 1997.

[AKW00] R. C. Alferness, H. Kogelnik, and T. H. Wood. The evolution of optical systems: Optics everywhere. *Bell Labs Technical Journal*, 5(1):188–202, Jan.–Mar. 2000.

[Alf99] R. Alferness, editor. *Bell Labs Technical Journal: Optical Networking*, volume 4, Jan.–Mar. 1999.

[Bak01] B. Bakhshi et al. 1 Tb/s (101 × 10 Gb/s) transmission over transpacific distance using 28 nm C-band EDFAs. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD21/1–3, 2001.

[Bar96] R. A. Barry, editor. *IEEE Network: Special Issue on Optical Networks*, volume 10, Nov. 1996.

[Big01] S. Bigo et al. 10.2 Tb/s (256 × 42.7 Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100 km TeraLight fiber with 1.28bit/s/Hz spectral efficiency. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD25/1–3, 2001.

[BKLW00] W. F. Brinkman, T. L. Koch, D. V. Lang, and D. W. Wilt. The lasers behind the communications revolution. *Bell Labs Technical Journal*, 5(1):150–167, Jan.–Mar. 2000.

[Bra89] C. A. Brackett, editor. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Lightwave Systems and Components*, volume 27, Oct. 1989.

[Cai01] J.-X. Cai et al. 2.4 Tb/s (120 × 20 Gb/s) transmission over transoceanic distance with optimum FEC overhead and 48% spectral efficiency. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD20/1–3, 2001.

[CHK+96] R. L. Cruz, G. R. Hill, A. L. Kellner, R. Ramaswami, and G. H. Sasaki, editors. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, volume 14, June 1996.

[CNW90] N. K. Cheung, G. Nosu, and G. Winzer, editors. *IEEE JSAC: Special Issue on Dense WDM Networks*, volume 8, Aug. 1990.

[CS83] J. S. Cook and O. I. Szentisi. North American field trials and early applications in telephony. *IEEE JSAC*, 1:393–397, 1983.

[CSH00] G. K. Chang, K. I. Sato, and D. K. Hunter, editors. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology: Special Issue on Optical Networks*, volume 18, 2000.

[CT98] A. R. Chraplyvy and R. W. Tkach. Terabit/second transmission experiments. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34(11):2103–2108, 1998.

[DL00] S. S. Dixit and P. J. Lin, editors. *IEEE Communications Magazine: Optical Networks Come of Age*, volume 38, Feb. 2000.

[DYJ00] S. S. Dixit and A. Yla-Jaaski, editors. *IEEE Communications Magazine: WDM Optical Networks: A Reality Check*, volume 38, Mar. 2000.

[FGO+96] M. Fujiwara, M. S. Goodman, M. J. O'Mahony, O. K. Tonguez, and A. E. Willner, editors. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, volume 14, June 1996.

[Fuk01] K. Fukuchi et al. 10.92 Tb/s (273 × 40 Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD24/1–3, 2001.

[GJR96] P. E. Green, F. J. Janniello, and R. Ramaswami. Multichannel protocol-transparent WDM distance extension using remodulation. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(6):962–967, June 1996.

[Gla00] A. M. Glass et al. Advances in fiber optics. *Bell Labs Technical Journal*, 5(1):168–187, Jan.–Mar. 2000.

[GLM+00] O. Gerstel, B. Li, A. McGuire, G. Rouskas, K. Sivalingam, and Z. Zhang, editors. *IEEE JSAC: Special Issue on Protocols and Architectures for Next-Generation Optical Networks*, Oct. 2000.

[Gna96] A. H. Gnauck et al. One terabit/s transmission experiment. In *OFC'96 Technical Digest*, 1996. Postdeadline paper PD20.

[Gre93] P. E. Green. *Fiber-Optic Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[HD97] G. R. Hill and P. Demeester, editors. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Photonic Networks in Europe*, volume 35, Apr. 1997.

[Hec98] J. Hecht. *Understanding Fiber Optics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998.

[Hec99] J. Hecht. *City of Light: The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press, New York, 1999.

[HSS98] A. M. Hill, A. A. M. Saleh, and K. Sato, editors. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, volume 16, Sept. 1998.

[Ish83] H. Ishio. Japanese field trials and applications in telephony. *IEEE JSAC*, 1:404–412, 1983.

[KH66] K. C. Kao and G. A. Hockham. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of IEE*, 133(3):1151–1158, July 1966.

[KK97a] I. P. Kaminow and T. L. Koch, editors. *Optical Fiber Telecommunications IIIA*. Academic Press, San Diego, CA, 1997.

[KK97b] I. P. Kaminow and T. L. Koch, editors. *Optical Fiber Telecommunications IIIB*. Academic Press, San Diego, CA, 1997.

[KKM70] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer. Radiation losses in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 17(10):423–425, Nov. 1970.

[KLHN93] M. J. Karol, C. Lin, G. Hill, and K. Nosu, editors. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology: Special Issue on Broadband Optical Networks*, May/June 1993.

[KLW06] I. Kaminow, T. Li, and A. E. Willner, editors. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology: Special 40th Anniversary Issue on Optoelectronics*, volume 24, Dec. 2006.

[KM98] F. W. Kerfoot and W. C. Marra. Undersea fiber optic networks: Past, present and future. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):1220–1225, Sept. 1998.

[Lin89] C. Lin, editor. *Optoelectronic Technology and Lightwave Communications Systems*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.

[Mac74] J. B. MacChesney et al. Preparation of low-loss optical fibers using simultaneous vapor deposition and fusion. In *Proceedings of 10th International Congress on Glass*, volume 6, pages 40–44, Kyoto, Japan, 1974.

[MK88] S. D. Miller and I. P. Kaminow, editors. *Optical Fiber Telecommunications II*. Academic Press, San Diego, CA, 1988.

[Mor96] T. Morioka et al. 100 Gb/s × 10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. In *OFC'96 Technical Digest*, 1996. Postdeadline paper PD21.

[MT83] A. Moncalvo and F. Tosco. European field trials and early applications in telephony. *IEEE JSAC*, 1:398–403, 1983.

[NO94] K. Nosu and M. J. O'Mahony, editors. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Optically Multiplexed Networks*, volume 32, Dec. 1994.

[Ona96] H. Onaka et al. 1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μm zero-dispersion single-mode fiber. In *OFC'96 Technical Digest*, 1996. Postdeadline paper PD19.

[Pru89] P. R. Prucnal, editor. *IEEE Network: Special Issue on Optical Multiaccess Networks*, volume 3, Mar. 1989.

[RT84] P. K. Runge and P. R. Trischitta. The SL undersea lightwave system. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 2:744–753, 1984.

[ST91] B. E. A. Saleh and M. C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley, New York, 1991.

[Sta83] J. R. Stauffer. FT3C—a lightwave system for metropolitan and intercity applications. *IEEE JSAC*, 1:413–419, 1983.

[VPM01] G. Vareille, F. Pitel, and J. F. Marcerou. 3 Tb/s (300 × 11.6 Gbit/s) transmission over 7380 km using 28 nm C+L-band with 25 GHz channel spacing and NRZ format. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD22/1–3, 2001.

[Wil00] A. E. Willner, editor. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics: Millennium Issue*, volume 6, Nov.–Dec. 2000.

[Yan96] Y. Yano et al. 2.6 Tb/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, 1996. Postdeadline paper Th.B.3.1.

[Zhu01] B. Zhu et al. 3.08 Tb/s (77 × 42.7 Gb/s) transmission over 1200 km of non-zero dispersion-shifted fiber with 100-km spans using C- L-band distributed Raman amplification. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD23/1–3, 2001.

第2章　元　器　件

本章将介绍光通信系统中最重要的元器件工作原理。对于每一个器件，首先给出简单的描述，接着再进行详细的数学处理。

现代光通信网络中使用的元器件包括耦合器、激光器、光检测器、光放大器、光开关、光滤波器和复用器。耦合器是一种将光信号合束和分束的简单器件。在耦合器之后，将介绍光滤波器和复用器，它们用在波分复用系统中对不同波长信号进行复用和解复用。接着，将介绍各种类型的光放大器，它们是用来补偿光纤和其他器件损耗的关键器件，在许多情况下，它们可以放大多个波长的信号。然后再介绍激光器，为理解其工作原理，有必要首先理解滤波器和光放大器的工作原理。半导体激光器是用于光通信系统中的主要发射器件。然后，讨论光检测器，它们将光信号还原到电信号。接着要讨论的器件是光开关，它们在光网络中起着关键的作用，使得光网络更灵活。最后，介绍波长变换器，在网络的边缘节点，以及网络内部的核心节点处，它们将信号从一个波长变换到另一个波长。

2.1　耦合器

定向耦合器被用来在光网络中合束和分束信号。一个 2×2 耦合器包括两个输入端口和两个输出端口，如图2.1所示。最常用的耦合器是将两芯光纤中部熔融在一起制成的，称为熔融光纤耦合器。在集成光学中，也可以用波导制作耦合器。在图2.1所示的 2×2 耦合器中，输入端口1的输入功率的 α 部分将被耦合至输出端口1，而其余的 $1-\alpha$ 部分功率将被耦合到输出端口2，在此 α 称为耦合比。

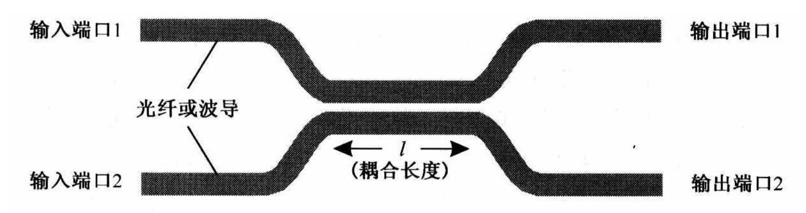


图2.1　定向耦合器示意图。耦合器通常是用两芯光纤熔融在一起的方法制作的。在集成光学中，也可以用波导制作这种耦合器

耦合器可以设计成与波长有关，也可以在一个相当宽的应用范围内设计成与波长无关（有时称为波长平坦）。在与波长无关的器件中，α 与波长无关；在与波长有关的器件中，α 随波长变化。

在光网络中，耦合器是一个多种用途的器件，可以有许多应用。最简单的应用是在网络中将光信号分束和合束。例如，一个耦合器能将输入信号平均分配到两个输出端口，只要调节耦合长度，即图2.1中的 l，可使每个输入端口功率的一半出现在每一个输出端口。这样的耦合器称为 3 dB 耦合器。一个 3 dB 2×2 耦合器可以自然扩展为 $n\times n$ 耦合器。后者是一个具有 n 个输入端口和 n 个输出端口的器件，它将每一个输入端口的功率平均分配到所有的输

出端口。将多个 3 dB 耦合器进行适当互连能够构成一个 $n \times n$ 星形耦合器，如图 2.2 所示。当需要将多个信号合束并广播到许多输出端口时，可以应用星形耦合器。然而，在集成光学中也可能有其他类型结构的 $n \times n$ 耦合器(例如，可以参看文献[Dra89])。

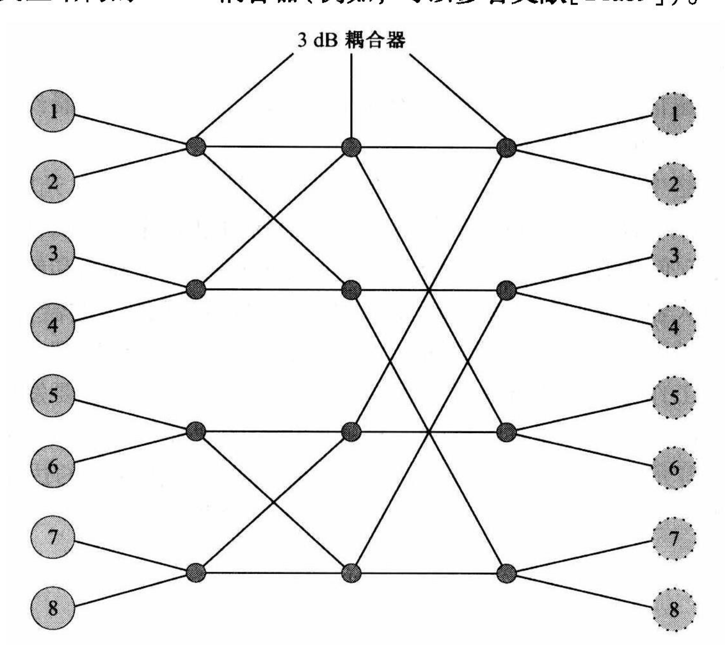


图 2.2 用 3 dB 耦合器组成的具有 8 个输入端口和 8 个输出端口的星形耦合器

耦合器也被用来从光束中分出一小部分功率用于监控目的或者其他目的。这样的耦合器也称为分支，其 α 值接近 1，典型值为 0.90 ~ 0.95。

耦合器是构成其他几种光器件的部件。在 2.5.4 节和 2.7 节中，将探讨定向耦合器在调制器和开关中的应用。耦合器也是用来构成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的主要部件，该器件可以用做光滤波器、复用器/解复用器，或者用做构成光调制器、光开关和波长变换器的部件。在 2.3.7 节中，将研究这些器件。

至此，已经考虑了与波长无关的耦合器。耦合器可以制作成与波长有关的，这就意味着它的耦合比依赖于信号波长。这样的耦合器广泛应用于将 1310 nm 波长信号和 1550 nm 波长信号无损耗地共同输入到一芯光纤中。在这种情况下，输入端口 1 的 1310 nm 波长的信号通过耦合器送到输出端口 1，而输入端口 2 的 1550 nm 波长的信号通过耦合器也送到输出端口 1。同一种耦合器也可以用来将一芯公共光纤上送入的两个信号分离。波长有关的耦合器也能够用来将 980 nm 波长和 1480 nm 波长的泵浦信号及 1550 nm 波长的信号一起送入掺铒光纤放大器中，如图 2.34 和图 2.37 所示。

当选择耦合器用于光网络时，除去耦合比 α 外，还需要考虑一些其他参数。过量损耗(excess loss)是超过由耦合比 α 引入的基本损耗以上的器件的损耗。例如，3 dB 耦合器的标称损耗是 3 dB，但是可能引入，比方说，0.2 dB 的附加损耗。另一个参数是耦合比 α 相对于标称值的变化，这一变化可能是由于制造容差及波长依赖性引起的。此外，对于大多数应用需要保持较低的偏振相关损耗(polarization-dependent loss，PDL)。

2.1.1 耦合器的工作原理

当两芯波导放置得非常接近时，如图2.1所示，光波将从一芯波导“耦合”到另一芯波导中。由于另一波导的存在，使得组合波导的传输模式十分不同于单芯波导的传输模式。如果两芯波导是一样的(本书只讨论这种情况)，注入一芯波导的光将完全耦合到另一波导，然后又回到第一芯波导，就这样周期性地来回耦合。这一耦合现象的定量分析必须应用耦合模理论(coupled mode theory)[Yar97]，这已超出本书的范围。这一分析的最终结果是，定向耦合器输出端口的电场 E_{o1} 和 E_{o2} 可以用输入端口的电场 E_{i1} 和 E_{i2} 表示如下：

$$\begin{pmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{pmatrix} = \mathrm{e}^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(\kappa l) & i\sin(\kappa l) \\ i\sin(\kappa l) & \cos(\kappa l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

式中，l 表示耦合长度(参见图2.1)；β 表示组成定向耦合器的两芯波导中，每一芯波导的传输常数；参数 κ 称为**耦合系数**，它是波导宽度、导波区(芯区)和衬底的折射率，以及两芯波导的接近程度的函数。在推导使用定向耦合器构成的更复杂器件的传递函数时，方程(2.1)被证明是有用的(见习题2.1)。

虽然定向耦合器具有两个输入端口和两个输出端口的器件，但是常常只有一个输入端口有输入信号，如输入端口1。在这种情况下，定向耦合器的功率传递函数为

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2(\kappa l) \\ \sin^2(\kappa l) \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

式中，$T_{ij}(f)$ 表示从输入端口 i 到输出端口 j 的功率传递函数，它定义为 $T_{ij}(f) = |E_{oj}|^2/|E_{ii}|^2$。在式(2.1)中，设 $E_{i2}=0$，就可以导出式(2.2)。

从式(2.2)可以看到，3 dB 耦合器的耦合长度必须满足 $\kappa l = (2\kappa+1)\pi/4$，其中 κ 为非负整数。

2.1.2 能量守恒

假定定向耦合器是无耗的，则可以推导出式(2.1)的普遍形式。假定输入和输出电场可以用下述形式的普遍方程相关联：

$$\begin{pmatrix} E_{o1} \\ E_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

则矩阵

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix}$$

就是关联输入和输出电场的器件的传递函数，称为**散射矩阵**(scattering matrix)。由于采用复数形式表示输入和输出电场，因此 s_{ij} 也是复数。在应用中，必须考虑这些复数场的实部。采用 s_{ij} 的复数表示法使我们很方便地表示任一感应相移。

为了方便，标记 $\boldsymbol{E}_o = (E_{o1}, E_{o2})^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{E}_i = (E_{i1}, E_{i2})^{\mathrm{T}}$，其中上标 T 表示矢量/矩阵的转置。用这一符号，式(2.3)可以缩写成 $\boldsymbol{E}_o = \boldsymbol{S}\boldsymbol{E}_i$。

耦合器输入功率的和正比于 $\boldsymbol{E}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_i^* = |E_{i1}|^2 + |E_{i2}|^2$。其中，* 表示复共轭。类似地，输出功率的和正比于 $\boldsymbol{E}_o^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_o^* = |E_{o1}|^2 + |E_{o2}|^2$。如果定向耦合器是无耗的，输出功率必须等于输

入功率，以至于

$$\begin{aligned} E_o^T E_o &= (SE_i)^T (SE_i)^* \\ &= E_i^T (S^T S^*) E_i^* \\ &= E_i^T E_i^* \end{aligned}$$

既然对于任意的 E_i 上述关系必须成立，因而必须有

$$S^T S^* = I \tag{2.4}$$

式中，I 是单位矩阵。注意，这一关系仅仅是从能量守恒得到的，因此能够容易地推广到带有任意输入和输出端口数的器件。

从器件的对称性，能够设定 2 × 2 定向耦合器的散射矩阵元具有关系 $s_{21} = s_{12} = a$ 和 $s_{22} = s_{11} = b$。用这种简化的散射矩阵关系，从式(2.4)可得

$$|a|^2 + |b|^2 = 1 \tag{2.5}$$

和

$$ab^* + ba^* = 0 \tag{2.6}$$

从式(2.5)，可以写出

$$|a| = \cos(x) \ \text{和}\ |b| = \sin(x) \tag{2.7}$$

设 $a = \cos(x)e^{i\phi_a}$ 和 $b = \sin(x)e^{i\phi_b}$，由式(2.6)可得

$$\cos(\phi_a - \phi_b) = 0 \tag{2.8}$$

因此，ϕ_a 和 ϕ_b 的差必须是$\pi/2$ 的奇数倍。现在可以从式(2.7)和式(2.8)得到式(2.1)的普遍形式。

对于能够构造的各种光器件，能量守恒有一些重要的推论。首先注意，对于 3 dB 耦合器，虽然两个输出端口的电场具有同样的大小，但是它们之间存在 $\pi/2$ 的相位移。正如刚看到的，这个由能量守恒导出的相对相位移在设计一些器件时起着至关重要的作用，例如，将要在 2.3.7 节中研究的马赫-曾德尔干涉仪就用到了这一原理。

能量守恒的另一个推论是无耗合波是不可能的。因此，不可能设计出一种三端口器件，其中两个端口输入的功率完全配送到第三个端口。这一结果在习题 2.2 中证明。

2.2 隔离器和环形器

耦合器和大多数其他无源光学器件都是互易器件，即如果将它们的输入和输出对换，则器件将以完全相同的方式工作。然而，在许多系统中需要无源非互易器件。隔离器(isolator)是这种器件的一个例子。它的主要功能是允许一个方向的光波通过它传输，但是在另一方向阻止所有光波传输。在系统中，隔离器被用于光放大器和激光器的输出处，主要为了防止反射波进入这些器件，否则这些器件的性能将恶化。隔离器的两个关键参数是插入损耗(insertion loss)和隔离度(isolation)，前者是前向传输的损耗，其值应尽可能小，后者是逆向传输损耗，其值应尽可能大。典型的插入损耗大约为 1 dB，隔离度大约为 40 ~ 50 dB。

环形器与隔离器类似，只是它有多个端口，典型地，可有 3 个或 4 个端口，如图 2.3 所示。在三端口环形器中，端口 1 的输入信号被送到端口 2 输出，端口 2 的输入信号被送到端

口3输出，端口3的输入信号被送到端口1输出。在2.3.4节中将看到，环形器可用于构建光上下路元件。由于环形器的工作原理与隔离器相同，因此下面只详细叙述隔离器如何工作。

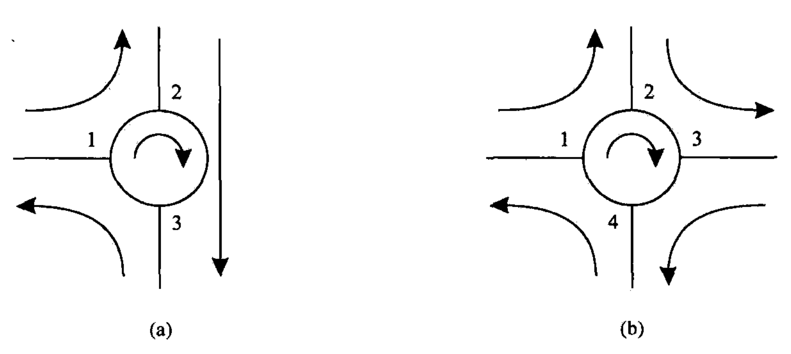


图2.3 环形器的功能示意图。(a)三端口环形器；
(b)四端口环形器。箭头表示信号流方向

2.2.1 工作原理

为了理解隔离器的工作原理，首先需要理解偏振(polarization)的概念。在2.3.3节中已经介绍过，单模光纤中传输的光波的偏振态(state of polarization，SOP)代表垂直于波传播方向的平面上光波电场矢量的指向。在任何时候，电场矢量能够表示成光纤中传输的两个正交的线偏振波的线性组合，称这两个偏振态为水平偏振态和垂直偏振态。

隔离器的工作原理如图2.4所示，假定输入光信号具有垂直SOP。光信号通过一个偏振器，该偏振器只允许垂直偏振态的光能量通过，而阻止水平偏振态的光能量通过。这样的偏振器能够通过使用被称为二向色性的晶体来实现，它具有选择吸收某一偏振态的光的特性。在偏振器后面接着一个法拉第旋转器(Faraday rotator)。法拉第旋转器是一个非互易器件，它用一种旋转偏振态的晶体制作，例如，该种晶体可以将偏振态顺时针旋转45°，而且与光的传播方向无关。法拉第旋转器后面接着另一个偏振器，它只允许上述垂直偏振态在法拉第旋转器旋转了45°后的光波通过。因此，从左到右的光信号将没有任何损耗地通过这一器件。另一方面，从右面进入器件的反射光具有与上述同样的45°偏振态指向，并在法拉第旋转器中再旋转45°，因此，被第一个偏振器阻止。

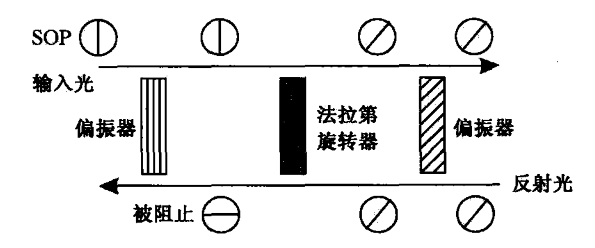


图2.4 仅工作于输入光的某一特殊偏振态的隔离器的工作原理

注意，前述解释假定输入光信号处于某一特定的偏振态。实际上，我们不能控制输入的偏振态，所以隔离器的工作必须与输入偏振态无关。这就需要更复杂的设计，并且已经有许多不同的设计方案。其中之一是图2.5所示的微型偏振无关隔离器的设计。带有任意偏振态

的输入信号被送到空间分离偏振器(spatial walk-off polarizer, SWP)。SWP 将信号分成两个正交的偏振分量。用双折射(birefringent)晶体能够实现这样的 SWP，该晶体的折射率对于这两个偏振分量是不同的。当带有任意偏振态的光投射在这样的晶体上时，两个正交偏振分量被折射到不同的角度。每个分量通过法拉第旋转器后，其偏振态都旋转 45°。法拉第旋转器后面接一个半波片(half-wave plate)。当光信号从左向右通过半波片(互易器件)时，其偏振态顺时针旋转 45°；当光信号从右向左通过半波片时，其偏振态逆时针旋转 45°。因而，法拉第旋转器和半波片的组合将水平偏振转换成垂直偏振，反之亦然。两个偏振信号在输出处的另一个 SWP 中相加。对于逆向的反射信号，半波片和法拉第旋转器的效应相互抵消，当这两个偏振信号通过上述两个器件时，偏振态保持不变，因此不能在输入处的 SWP 中相加。

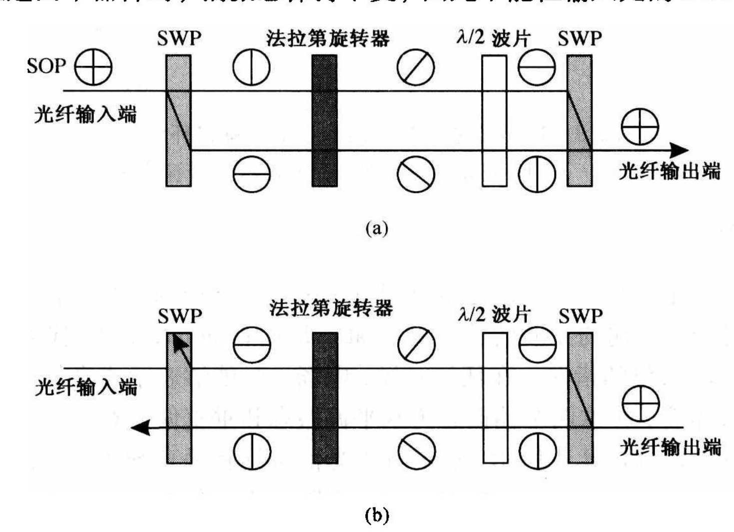


图 2.5 一种偏振无关的隔离器。这种隔离器的构成与偏振依赖隔离器相同，只是在输入端和输出端处采用空间分离偏振器(SWP)。(a)光信号从左向右传输；(b)光信号从右向左传输

2.3 复用器和滤波器

在这一节将研究各种波长选择技术的基本工作原理。光滤波器是传输系统中的重要部件，它们至少有两种应用：一种应用是在波分复用(WDM)系统中波长复用和解复用，这类器件称为复用器/解复用器；另一种应用是在光放大器中提供增益均衡和滤除噪声。此外，了解光滤波器对于了解这一章后面介绍的激光器工作原理也是重要的。

光滤波器的不同应用如图 2.6 所示。简单的滤波器是一种两端口器件，它选择一个波长而阻止所有其他波长通过。它也可以附加第三个端口，由此端口输出被阻止的波长。复用器可以将它的各个端口输入的不同波长的信号联合输出到一个公共的输出端口，而一个解复用器则完成相反的功能。复用器和解复用器被用于波分复用(WDM)终端及较大的波长交叉互连(wavelength crossconnect, WXC)和波长上下路(分插)复用器(wavelength add/drop multiplexer)中。

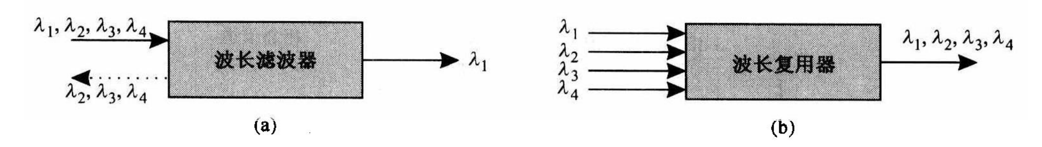


图2.6 光滤波器在光网络中的不同应用。(a)一个简单的滤波器，它选择一个波长信号而不让其他的波长信号通过，或者将这些其他波长信号从第三个端口输出；(b)一个复用器，它将多个波长信号一起输入到单一光纤。同样的器件在相反的方向起着解复用器的作用，它将不同的波长分开

解复用器和复用器能够级联，以实现静态的波长交叉互连(WXC)。在一个静态的 WXC 中，交叉互连的方式在器件制造完成后就被固定，不能动态地改变。图 2.7 给出了一个静态 WXC 的例子。该器件依据波长将信号从一个输入端口路由到一个输出端口。将光开关同复用器和解复用器组合起来能够构成动态 WXC。静态 WXC 在功能上是大大受限的。由于这一原因，感兴趣的器件是动态 WXC，而不是静态 WXC。在第 4 章中，将研究几种不同的动态 WXC 结构。

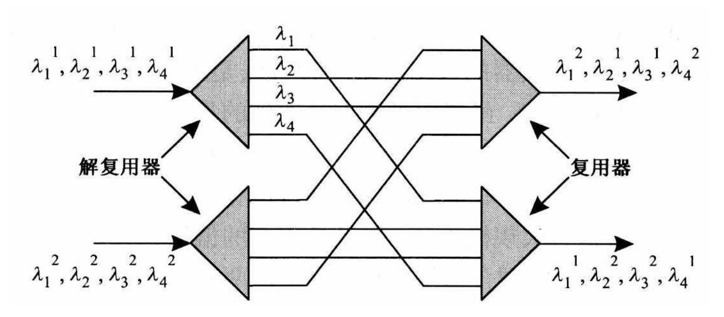


图2.7 一个静态的波长交叉互连。该器件依据波长将信号从一个输入端口路由到一个输出端口

现有各种各样的光滤波技术。在系统中应用时，它们的关键性能如下：

1. 好的光滤波器应该具有低插入损耗(insertion loss)。插入损耗是滤波器输入端到输出端之间的损耗。
2. 这一损耗应与输入信号的偏振态无关。在大多数系统中，偏振态随着时间随机变化，如果滤波器的损耗与偏振有关，则输出功率同样随时间变化，这是我们不希望有的。
3. 滤波器的通带应该对环境温度的变化不敏感。温度系数(temperature coefficient)是每单位温度变化所引起的波长漂移量。系统的要求是在整个工作温度范围内(典型值大约 100℃)波长漂移应比 WDM 系统中相邻信道的波长间隔小很多。
4. 在 WDM 系统中，越来越多的滤波器被级联使用，通带变得越来越窄。为了保证在级联的终端具有相当宽的通带，单个滤波器应该具有很平的通带，以至于能够容纳激光器工作波长随时间的小变化。滤波器的波长平坦度用 1 dB 带宽来量度，如图 2.8 所示。
5. 同时，通带裙(前后沿)应该很陡峭，以降低相邻信道通过的能量。这一能量被看成是串扰(crosstalk)，它将恶化系统性能。串扰抑制或者滤波器的隔离度(isolation)被定义为相邻信道通过的相对功率，这也是一个重要的参数。

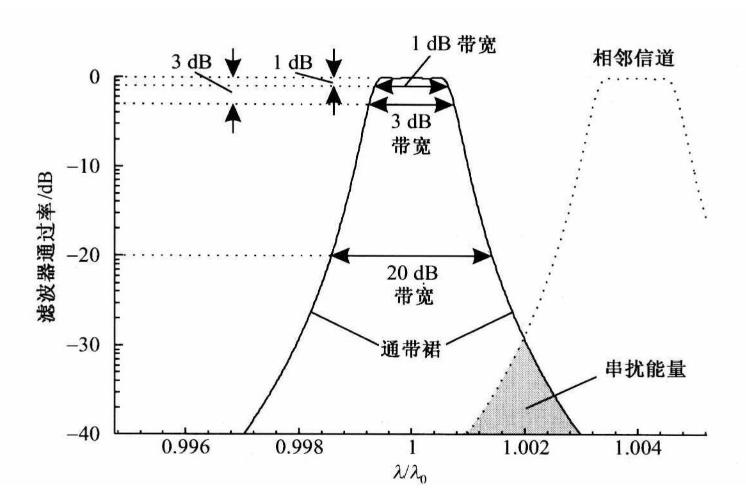


图 2.8　某些表征光滤波器的重要谱形状参数。λ_0是滤波器的中心波长，λ表示光信号的波长

除去上述所有性能参数，也许最需要考虑的是成本。需要仔细地手工装配的技术总是更费钱的。有两种方法能够降低光滤波器的成本。第一种方法是采用集成光波导技术制造滤波器。这种技术类似于半导体芯片的制造，虽然用光学方法达到的集成度小得多。可以采用许多种基质材料制作这些光波导，包括二氧化硅、硅、InGaAs 及一些聚合物。波导的几何形状使得它们往往是固有偏振相关的，并且必须小心地降低这些器件的偏振相关损耗(PDL)。第二种方法是实现全光纤器件。这种器件适合大规模生产，并且是固有的偏振无关器件。将光信号从别的光纤耦合输入到这些器件，或者反向耦合都很容易。当前这两种方法都正在继续采用。

研究的所有滤波器和复用器都利用了光波之间的干涉特性。此外，某些滤波器，如光栅，利用了衍射特性——从光源发出的光依据注入波长向所有方向发散。表 2.1 比较了不同滤波技术的性能。

表 2.1　无源波长复用/解复用技术比较。假定系统有 16 个信道，信道间隔为 100 GHz。考虑的其他关键问题包括中心波长精度和可制造性。所有这些方法都面临波长数增加所引起的问题。TFMF 是介质膜多腔滤波器，AWG 是阵列波导光栅。采用无源温度补偿方法，光纤布拉格光栅和阵列波导光栅的温度系数能够降到 0.001 nm/℃。光纤布拉格光栅是单信道滤波器，需要串联多个滤波器才能解复用所有的 16 个信道

滤波特性	光纤布拉格光栅	TFMF	AWG	Stimax 光栅
1 dB 带宽/nm	0.3	0.4	0.22	0.1
隔离度/dB	25	25	25	30
损耗/dB	0.2	7	5.5	6
偏振相关损耗/dB	0	0.2	0.5	0.1
温度系数/(nm/℃)	0.01	0.0005	0.01	0.01

2.3.1　光栅

光栅(grating)这一术语被用来表示这样一类器件，它们的工作原理涉及从同一光源发出的带有不同相对相位移的许多光信号之间的干涉。有一种被称为标准具(etalon)的例外器

件，其中多个光信号是由于光在单个腔中多次往返重复行进而产生的。角频率为 ω、在 z 方向传输的电磁波（光）与 z 和 t 的关系可以表示为 $\cos(\omega t-\beta z)$。其中，β 是传输常数，它依赖于介质特性。波的相位是 $\omega t-\beta z$。因此，从同一源发出的两列波经过不同长度的路径，它们之间就会产生相位移。

两个光栅的例子如图2.9(a)和(b)所示。光栅已经广泛应用了几个世纪，用以分离光信号中不同波长的成分。在 WDM 通信系统中，光栅被用做解复用器，将不同的光波长分离，或者用做复用器，将不同的光波长合束。在表2.1中，Stimax 光栅是本节下面将要介绍的一种光栅。

首先，考虑如图2.9(a)所示的光栅。在一个平面上等间距放置许多窄的隙缝，该平面称为光栅平面(grating plane)。两相邻隙缝间的间距称为光栅的节距(pitch)。从光栅一边的光源注入的光将通过这些隙缝。因为每个隙缝是很窄的，由著名的衍射(diffraction)现象，从每个隙缝通过的光将发散到所有方向。因此，每个隙缝起着二次光源的作用。考虑某个平行于光栅平面的另一平面，通过所有隙缝的光将在这一平面上干涉，称此平面为像平面(imaging plane)。考虑该像平面上的任一点。如果在这一点处某些波长的各个相干子波是同相的，则它们相干相加，使这些波长的光强增加。在通常遇到的实际情况中，隙缝数很大，其他波长的光波就不能相干相加，在这一点处这些波长的光强很小。因为不同波长的光在像平面上不同点相干相加，这样光栅就将 WDM 信号中不同波长信号空间分离。在光纤光学系统中，各芯光纤能够放在不同的成像点，用以收集不同波长的光。

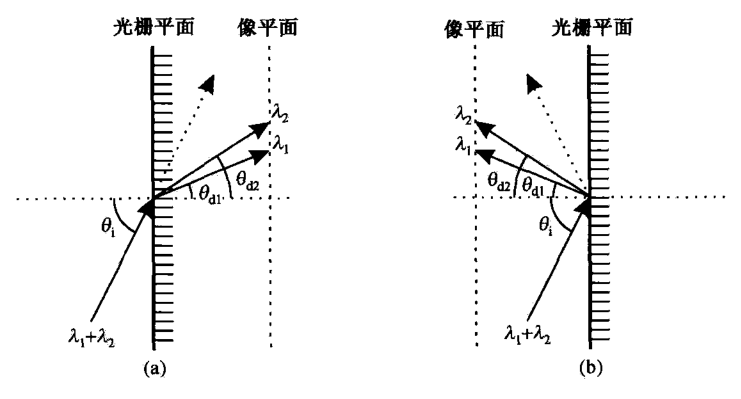


图2.9 (a) 透射光栅；(b) 反射光栅。θ_i 是光信号的入射角。信号衍射角度依赖于波长（波长 λ_1 时为 θ_{d1}，而波长 λ_2 时为 θ_{d2}）

注意，如果没有衍射，则光波只沿着图2.9(a)和(b)中虚直线透射或反射，因此衍射现象是这些器件工作的关键。由于这一原因，这些器件被称为衍射光栅(diffraction grating)。由于图2.9(a)中的光栅中出现多束透射光，这一光栅被称为透射光栅(transmission grating)。如果用窄的反射面代替透射隙缝，而光栅表面其余部分不反射光，则可以得到图2.9(b)中的反射光栅。这一器件的工作原理完全类似于透射光栅。实际使用的大部分光栅是反射光栅，因为它们比较容易制造。除了已经考虑的平面几何形状外，光栅也可以制成凹面几何形状。在这种情况下，(对于透射光栅的)隙缝处在一个圆的弧上。在许多应用中，人们宁愿使用凹面几何形状构成整个器件，例如 WDM 解复用器，只需使用较少的辅助零件，如透镜和反射镜。

Stimax 光栅[LL84]是一种反射光栅，它与一个凹面反射镜及输入和输出光纤集成在一起。

其特性如表2.1所述，并且已被用于商用WDM传输系统中。然而，它是一种体器件，制造不容易，因而相当贵。有人试图用光波导技术制作类似的光栅，但是这些器件还没有实现可与体器件相比的损耗、PDL和隔离度。

工作原理

为了定量地理解(透射)光栅的工作原理，考虑光波通过图2.10所示的相邻隙缝的情况。用 a 标记相邻隙缝之间的距离，即光栅的节距(pitch)。假定光源到光栅平面的距离比 a 大得多，以至于可以假定在每一个隙缝处光波以同样的角度 θ_i 注入到光栅平面。考虑光射线以角度 θ_d 从光栅平面衍射出去。和光源一样，比较光栅节距，假定像平面也远离光栅平面。同时假定隙缝比波长小，以至于在整个隙缝内的相位变化可以忽略。在这样的假定下，能够得到穿过相邻隙缝的射线之间路径长度差为线段 AB 和 CD 之间的长度差，可以用 $a[\sin(\theta_i)-\sin(\theta_d)]$ 近似表示(习题2.4)。因此，在像平面处，波长 λ 的光信号在角度 θ_d 衍射的射线之间实现相干相加的条件是对于某些整数 m，下述光栅方程成立：

$$a[\sin(\theta_i)-\sin(\theta_d)]=m\lambda \tag{2.9}$$

式中，m 称为光栅的级数(order)。光栅能够实现WDM信号中各个波长的分离，这是因为不同的波长在像平面的不同点上满足光栅方程。图2.9说明了这一点，其中不同波长的光在满足光栅方程的角度被衍射。例如，θ_{d1} 是波长为 λ_1 时光栅方程成立的衍射角。

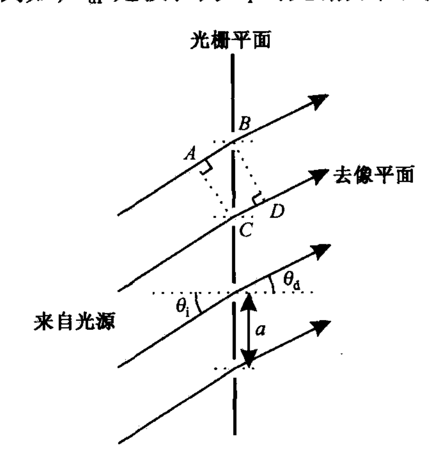


图2.10 透射光栅的工作原理。反射光栅的工作原理与此类似。以角度 θ_d，从相邻隙缝衍射的射线之间的路径长度差为 $AB-CD=a[\sin(\theta_i)-\sin(\theta_d)]$

注意，单个波长的能量将分布在满足这个波长的光栅方程(2.9)的所有分立角度上。当光栅被用做WDM系统中的解复用器时，仅从这些分立角度中的一个收集光波，其余各衍射级的能量丢失掉了。事实上，大部分能量将集中在零级($m=0$)干涉最大值中，对于所有波长，它都出现在 $\theta_i=\theta_d$ 位置。但因为在这个位置上各个波长没有被分开，这个零级干涉最大值中的能量被浪费了，因此必须设计光栅使得在别的(不是零级的)干涉最大值处光能量最大。使用闪耀(blazing)技术[KF86, p. 386]可以做到这一点。

图2.11表示了闪耀角为 α 的闪耀反射光栅。在这样的光栅中，反射隙缝相对于光栅平面倾斜 α 角度。这样做使得级数相应于闪耀角的干涉最大值中光能量最大。和以前一样，这样的闪耀光栅的光栅方程也能够推导出，参看习题2.5。

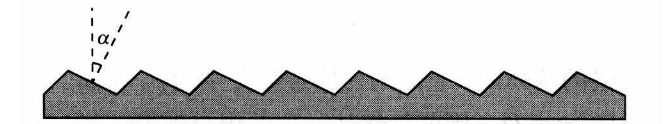


图2.11 一个闪耀角为 α 的闪耀光栅。闪耀角最大时干涉能量值最大

2.3.2 衍射图样

至此，只考虑了衍射图样中衍射最大值的位置。我们常常也对衍射最大值中的强度分布感兴趣，并能够导出这一强度分布。首先，需要放松隙缝比波长小很多的假定，以至于隙缝上的相位变化不能再被忽略。考虑长度为 w 的隙缝，它从 $y=-w/2$ 延伸到 $y=w/2$。沿着在图2.10中所做的相同方法进行推理，从这一隙缝的 y 点位置，以角度 θ 衍射的光与 $y=0$ 处衍射的光之间的相对相位移 $\phi(y)=(2\pi y\sin\theta)/\lambda$。因此，在像平面处，在角度 θ 方向的振幅 $A(\theta)$ 为

$$\begin{aligned}\frac{A(\theta)}{A(0)} &= \frac{1}{w}\int_{-w/2}^{w/2}\exp(i\phi(y))\,\mathrm{d}y\\ &= \frac{1}{w}\int_{-w/2}^{w/2}\exp(i2\pi(\sin\theta)y/\lambda)\,\mathrm{d}y \qquad (2.10)\\ &= \frac{\sin(\pi w\sin\theta/\lambda)}{\pi w\sin\theta/\lambda}\end{aligned}$$

可以看到，在像平面上的振幅分布是矩形隙缝的傅里叶变换。这一结果不仅仅对矩形隙缝成立，而且对一般的衍射孔径都成立。对于这种更普遍的情况，如果衍射孔径或隙缝用 $f(y)$ 表示，则衍射图样可以用下式给出：

$$A(\theta)=A(0)\int_{-\infty}^{\infty}f(y)\exp(2\pi i(\sin\theta)y/\lambda)\,\mathrm{d}y \qquad (2.11)$$

强度分布用 $|A(\theta)|^2$ 表示。其中，$f(y)$ 已被归一化，以使 $\int_{-\infty}^{\infty}f(y)\mathrm{d}y=1$。对于矩形隙缝，在 $|y|<w/2$ 处，$f(y)=1/w$；在其余位置，$f(y)=0$，其衍射图样由式(2.10)给出。对于相距 d 的一对窄缝，

$$f(y)=0.5(\delta(y-d/2)+\delta(y+d/2))$$

以及

$$A(\theta)=A(0)\cos(\pi(\sin\theta)\lambda/d)$$

在习题2.6中将讨论更普遍的 N 个窄缝的问题。

2.3.3 布拉格光栅

布拉格光栅广泛应用于光纤通信系统中。一般来说，传输介质中任何周期扰动都可以用做布拉格光栅。这一扰动通常是介质折射率的周期变化。在2.5.1节中，将看到在激光器中使用布拉格光栅可以实现单频工作。在这种情况下，布拉格光栅被“写”在波导中。写在光纤上的布拉格光栅可以制作多种器件，如滤波器、分插复用器和色散补偿器。后面还将看到，布拉格光栅的原理也是声光可调谐滤波器的工作基础。在这种情况下，布拉格光栅是由介质中声波传输形成的。

工作原理

考虑在相反方向传输的两列波，它们的传输常数分别为β_0和β_1。如果它们满足下述布拉格相位匹配(phase-matching)条件，则能量将从一列波耦合到另一列。

$$|\beta_0 - \beta_1| = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

式中，Λ是光栅周期。在布拉格光栅中，具有合适波长的光波前向传输模式的能量被耦合到另一反向传输模式中。考虑具有传输常数β_1的一列光波从左向右传输。如果

$$|\beta_0 - (-\beta_0)| = 2\beta_0 = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

则这一列光波的能量被耦合到反向行进的、同一波长的散射波中。设$\beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda_0$，其中，$\lambda_0$为是入射波的波长，$n_{\text{eff}}$为波导或光纤的有效折射率。如果

$$\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

则这列波将被反射。λ_0称为布拉格波长。实际上，当入射波的波长调谐到偏离这一布拉格波长时，反射率就要下降，如图2.12(a)所示。因此，如果几个波长信号发送至光纤布拉格光栅，则布拉格波长被反射而其余的波长信号将通过光栅。

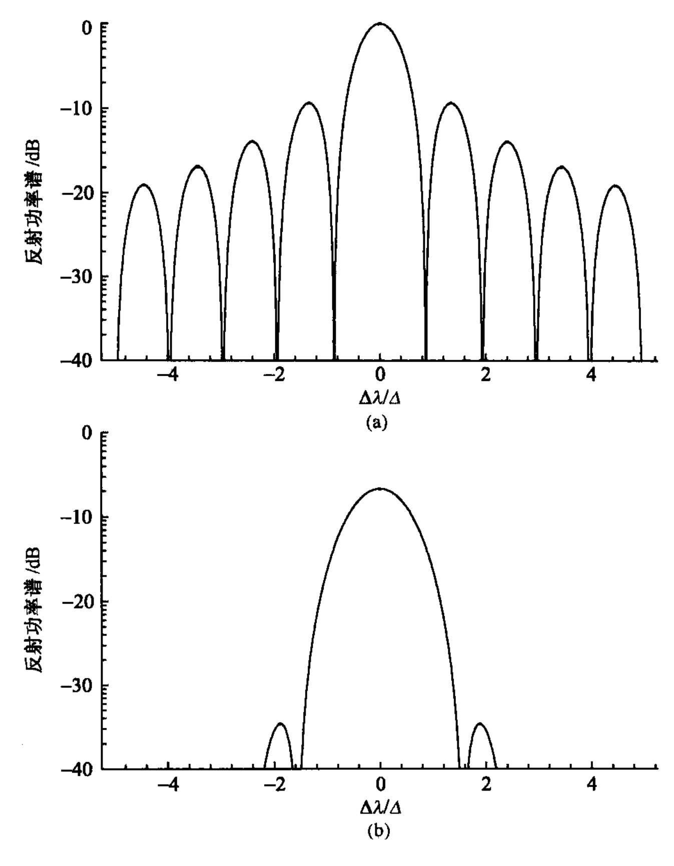


图2.12 布拉格光栅的反射谱：(a) 均匀折射率剖面的情况；(b) 切趾折射率剖面的情况。Δ是光栅带宽的量度，即图中峰值波长与第一反射极小值处波长之间的差。在均匀折射率剖面的情况下，Δ反比于光栅长度。$\Delta\lambda$是偏离相位匹配波长的大小

参考图 2.13 能够理解布拉格光栅的工作原理，图中显示了一个折射率周期变化的结构。入射波在光栅的每一个周期处反射。当用波长λ_0量度路径长度，每一周期长度等于注入波长λ_0的一半时，这些反射波将同相叠加。这就相当于 $n_{eff}\Lambda = \lambda_0/2$，也就是布拉格条件。

图 2.12(a)所示的反射谱是沿光栅长度上折射率均匀变化时的反射谱。为了消除不希望有的旁瓣，可能制作一个切趾(apodized)光栅，其中折射率变化量向着光栅边界逐渐减小。(术语“切趾”意味着“切去足”。)切趾光栅的反射谱如图 2.12(b)所示。由该图可以注意到，切趾光栅的旁瓣明显减小了，其代价是增加了主瓣宽度。

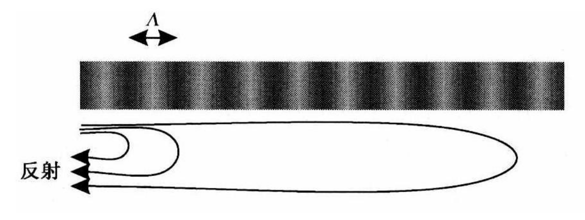


图 2.13 布拉格光栅的工作原理

布拉格光栅沿长度的折射率分布类似于 2.3.2 节讨论的光栅孔径情况，可以获得光栅的反射谱，该反射谱即为折射率分布的傅里叶变换。均匀折射率剖面情况引起的旁瓣是由光栅的起始和终了处折射率的突变引起的，这就造成了旁瓣的 sinc(·) 函数的行为。切趾技术使得光栅起始和终了处折射率逐渐变化。这一技术类似于数字通信中使用的脉冲成形技术，以减小信号发送谱的旁瓣。

光栅带宽可以用主瓣宽度量度，它反比于光栅的长度。典型情况下为了获得 1 nm 的带宽，光栅长度应为几毫米长。

2.3.4 光纤光栅

光纤光栅是一种有吸引力的器件，它能有多种应用，包括滤波和上下路功能，以及补偿系统中积累的色散。作为全光纤器件，它们的主要优点是低损耗、容易(与其他光纤)耦合、偏振不敏感、低温度系数和封装简单。由于这些原因，它们是一类成本极低的器件。

利用某种光纤的光敏特性(photosensitivity)可以在光纤中写入光栅。用锗掺杂使得通常的二氧化硅光纤变得对光极端敏感。将这种光纤暴露在紫外(UV)光下将引起光纤纤芯内部折射率的变化。因此，将此种光纤的纤芯暴露在两束相干 UV 光束下就能在光纤上写入光栅。这样就可以使辐射强度沿光纤长度产生周期性变化。在强度高的地方，折射率增加，而在强度低的地方折射率不变化。形成光栅所需的折射率变化量是十分小的——大约 10^{-4} 量级。别的技术，诸如相位掩模(phase mask)，也能被用来制造光栅。相位掩模是一个衍射光学器件。用一束光照射相位掩模，它将光束分成各级衍射光，然后各级衍射光相互干涉，从而在光纤中形成光栅。

根据光栅的周期可将光纤光栅分成短周期(short-period)光栅和长周期(long-period)光栅。短周期光栅也称为布拉格光栅，它的周期与波长可比较，典型值为 0.5 μm。在 2.3.3 节中已讨论了布拉格光栅的特性。另一方面，长周期光栅具有比波长大得多的周期，其范围从几百微米到几毫米。

光纤布拉格光栅

已经能够制出具有极低损耗(0.1 dB)、高波长精度(± 0.05 nm 很容易实现)、高的相邻信道串扰抑制比(40 dB)及平坦滤波曲线的光纤布拉格光栅。

由于光纤长度随温度变化,光纤布拉格光栅温度系数的典型值为 1.25×10^{-2} nm/℃。然而,如果将光栅与具有负的热膨胀系数的材料封装在一起,则可以补偿这一变化。这些无源温度补偿光栅的温度系数大约为 0.07×10^{-2} nm/℃。这就表明在 100℃ 的温度范围内中心波长漂移只是很小的 0.07 nm,这一结果说明,这些光栅可以在没有有源温度控制的情况下工作。

光纤布拉格光栅的这些特性使得它们成为系统应用中很有用的器件。布拉格光栅在 WDM 系统中发现了许多应用,从滤波器和光上下路元件到色散补偿。基于光纤布拉格光栅的一个简单的下路元件如图 2.14(a)所示。它包括一个三端口环形器和光纤布拉格光栅。环形器将端口 1 过来的光发送到端口 2,并且将端口 2 过来的光发送到端口 3。在这种情况下,光栅反射了所期望的波长 λ_2,该波长信号将在端口 3 下路。其余的三个波长信号则通过光栅。如果如图 2.14(b)所示引入一个耦合器加入与下路波长相同的波长信号,则沿着同样的线路就可能实现上下路功能。用光栅联合耦合器和环形器,能够实现这种简单的上下路元件的各种变化结构。在这些设计中主要涉及的问题是这些光栅不能完全反射信号,结果是所选波长的部分功率会通过光栅泄漏出去。这就产生了不期望的串扰。

光纤布拉格光栅也能用来补偿沿着链路累积的色散。

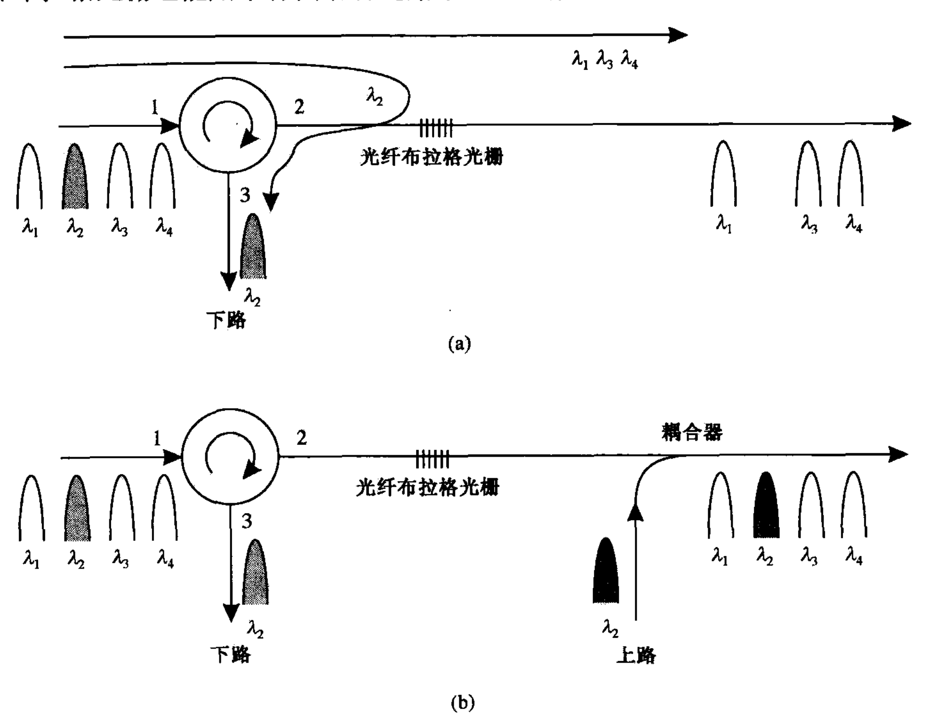


图 2.14 基于光纤布拉格光栅的光上下路元件:(a) 下路元件;(b) 上下路元件

长周期光纤光栅

长周期光纤光栅的制作方法与光纤布拉格光栅相同，如今它们主要被用在掺铒光纤放大器中作为滤波器，以补偿放大器增益谱的不平坦。正如将要看到的，这些器件用来制作很有效的带阻滤波器，并且能够定制，用以非常精确地均衡铒增益谱。图2.15表示了此种光栅的传输谱。这些光栅保持了光纤光栅所有优越的特性，可以预期，它们将成为广泛使用的滤波器件。

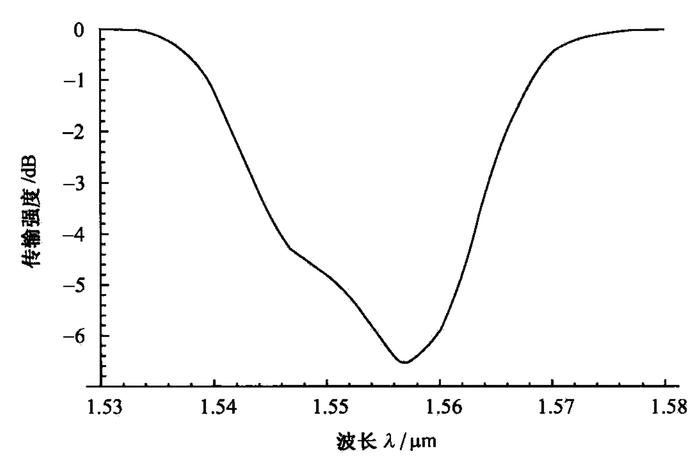


图2.15 用做掺铒光纤放大器增益均衡器的长周期光纤光栅①的传输谱(参见文献[Ven96a])

工作原理

这种光栅的工作原理与布拉格光栅有些不同。在光纤布拉格光栅中，光纤纤芯中具有合适波长的前向传输模式的能量被耦合到反向传输模式。在长周期光栅中，光纤纤芯中的前向传输模式的能量被耦合到包层中的其他前向传输模式中。这些包层模式传输损耗极大，由于包层与空气界面上的损耗和光纤的微弯损耗，当它们沿光纤传输时能量很快衰减。包层模很多，但是只能在某一给定波长的一个纤芯模式和一个包层模之间实现耦合，并且与光栅的节距Λ有关。其规律如下：如果用β表示纤芯中模式(假定是单模光纤)的传输常数，β_{cl}^{p}表示第p阶包层模的传输常数，则相位匹配条件规定为

$$\beta - \beta_{cl}^{p} = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

一般来说，纤芯模式与任一包层模式的传输常数的差别很小，因而Λ的值相当大才能实现耦合。这个量通常是几百微米。(注意，在布拉格光栅中前向和反向传输模式之间传输常数差很大，因此Λ的值很小，其典型值大约为0.5 μm。)如果n_{eff}和n_{eff}^{p}表示纤芯模和第p阶包层模的有效折射率，则能够得到，能量能够从纤芯模耦合到包层模的波长应为

$$\lambda = \Lambda(n_{eff} - n_{eff}^{p})$$

式中，利用了关系式$\beta = 2\pi n_{eff}/\lambda$。

因而，一旦知道了纤芯和包层模式的有效折射率，就能设计具有适当Λ值的光栅，使得在所要求的波长带中实现能量耦合。这就使光栅成为一个波长相关的损耗元件。在文献[Ven96b]中讨论了计算包层模传输常数的方法。在制造过程中，控制紫外线的曝光时间就

① 原著中为长周期光纤布拉格光栅——译者注。

能够控制波长相关损耗的大小。级联多个不同中心波长和不同曝光时间的光栅可能得到复杂的传输谱。将两个这样的光栅级联，就能得到图 2.15 给出的例子[Ven96a]。这些光栅的典型长度是几厘米。

2.3.5 法布里-珀罗滤波器

法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器由两个相互平行放置的、具有高反射率的反射镜所形成的腔组成，如图 2.16 所示。这种滤波器也称为法布里-珀罗干涉仪或标准具。输入光束垂直于第一个反射镜镜面射入滤波器。滤波器的输出是离开第二个反射镜的光束。

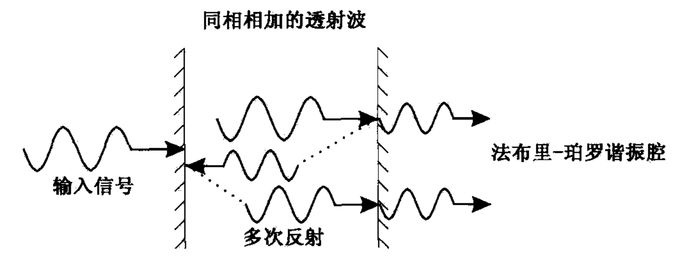


图 2.16 法布里-珀罗滤波器的工作原理

这是一种经典的器件，已经广泛用于各种干涉测量中。法布里-珀罗滤波器已经在几个光网络试验平台中用做波分复用(WDM)器件。现在已经有更好的滤波器，如薄膜谐振多腔滤波器，这种滤波器将在 2.3.6 节中研究。由于可以将它们看做反射镜的反射率与波长有关的法布里-珀罗滤波器，因此这些滤波器的工作原理与法布里-珀罗滤波器相同。一些激光器中也用了法布里-珀罗滤波器(见 2.5.1 节)。

小型法布里-珀罗滤波器已经是商用器件。相对于某些其他器件，其主要优点是它们可以调谐，以便在 WDM 系统中选择不同的信道，这一点将在后面介绍。

工作原理

这一器件的工作原理如图 2.16 所示。输入信号注入到腔的左表面，信号通过腔后，部分光波通过右端面离开腔，部分被反射。这一反射波的一部分再次被左端面反射到右端面。若腔长度是腔中半波长的整数倍，以至于腔中一个来回的路径长度等于波长的整数倍，则通过右端面的所有光波同相相加。这些波长称为腔的谐振波长。习题 2.7 中讨论了腔的谐振波长的确定方法。

滤波器的功率传递函数是被滤波器传送的部分光功率与输入光功率的比值，是光波频率 f 或波长的函数。对于法布里-珀罗滤波器，这一函数用下式表示：

$$T_{\mathrm{FP}}(f)=\frac{\left(1-\frac{A}{1-R}\right)^2}{\left(1+\left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R}\sin(2\pi f\tau)\right)^2\right)} \tag{2.12}$$

该式也可用光波的自由空间波长 λ 表示成

$$T_{\mathrm{FP}}(\lambda)=\frac{\left(1-\frac{A}{1-R}\right)^2}{\left(1+\left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R}\sin(2\pi nl/\lambda)\right)^2\right)}$$

（略微滥用了一下符号，我们用了同样的符号表示两种情况下的功率传递函数。）其中，A 表示每个反射镜的吸收损耗，它用反射镜吸收注入光的比例来标记；量 R 表示每个反射镜的反射率（假定两个反射镜相同），它用反射镜反射注入光的比例来标记；τ表示跨越腔的单程传输延迟；腔的折射率用 n 表示；腔的长度用 l 表示。因此，可得$\tau = nl/c$，其中 c 是真空中光速。考虑光波通过腔奇数次后透过滤波器的各次波的和，可以导出上述传递函数。这一问题留下作为读者的练习题（习题2.8）。

图2.17 中给出了在$A = 0$ 和$R = 0.75$、0.9 及0.99 情况下的法布里-珀罗滤波器的功率传递函数。注意，为了获得相邻信道之间的高隔离度，需要反射镜的反射率很高。

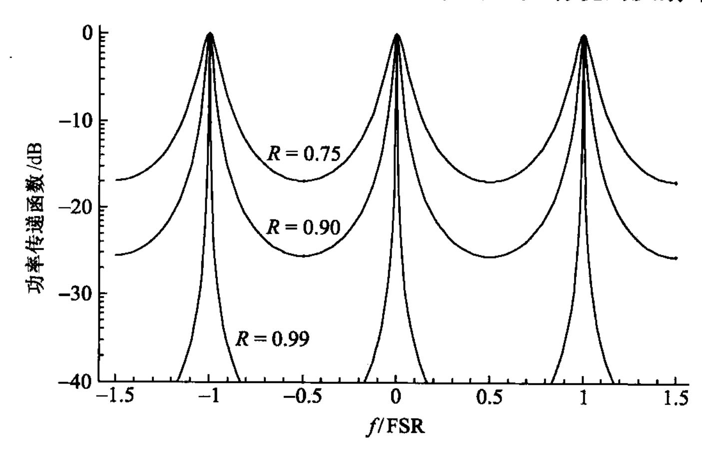


图2.17 法布里-珀罗滤波器的功率传递函数。FSR 表示自由谱区，f表示频率，R 表示反射率

功率传递函数 $T_{FP}(f)$ 是f的周期函数，并且具有许多峰值，或者说，具有许多通带，对于某些正整数 k，功率传递函数的通带出现在满足$f\tau = k/2$ 的频率f处。因此，在 WDM 系统中，即使信道波长间隔与滤波器传递函数的每个通带宽度相比足够远，但如果这些波长与不同的通带重合，则仍然有几个频率（或波长）的光波透过滤波器。在滤波器两个相邻通带之间的频谱范围称为自由谱区（free spectral range，FSR）。用传递函数等于最大值的一半处曲线的全宽，即半高全宽（FWHM）量度每个通带的宽度。在 WDM 系统中，为了使串扰减小，两个相邻信道波长之间的间隔必须至少是 FWHM 宽度。（更严格说，因为传递函数是周期性的，所以两个相邻信道波长必须分开 FWHM 加上 FSR 的整数倍。）因此，比值 FSR/FWHM 是系统能够容纳的波长数的近似值（数量级）。这一比值称为滤波器的细度（finesse），用 F 表示，即

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \tag{2.13}$$

这一表达式能够从式（2.12）导出。这一问题也留下作为读者的练习题（习题2.9）。

如果反射镜具有高的反射率，那么注入光实际上是否全部被反射？同时，如果反射镜具有高反射率，光波如何从腔输出？为了解决这一矛盾，必须考察所有频率范围的光能量。如果这样做，将看到由于输入和输出镜面的高反射率，仅只有一小部分输入光透过腔，但是在正确的频率处，所有功率都能透过。这一方面的问题将在习题2.10 中进一步进行探讨。

可调谐性

可以使用几种方法之一对法布里-珀罗滤波器进行调谐，以选择不同的波长。最简单的

方法是改变腔长。改变腔内介质折射率也能达到同样的效果。考虑一个 WDM 系统，它的所有工作波长都在法布里-珀罗滤波器的一个 FSR 频带之内。对于某些正整数 k，由滤波器选择的频率f_0 满足$f_0\tau = k/2$，因此改变τ就能够改变f_0，其中τ是光波跨越腔的单程传输时间。如果用l表示腔长，n 表示腔中介质折射率，则有$\tau = l\,n/c$，其中 c 为真空中光速。因此，改变 l 或 n，就能改变τ。

通过移动反射镜之一以改变腔长就可实现滤波器的机械调谐。这种方法可在几毫秒量级的时间内实现调谐。机械调谐法布里-珀罗滤波器需要精密的机械结构，使得两个反射镜在相对移动时保持相互平行。机械调谐结构的可靠性也较差。

另一种调谐方法是在腔中使用压电材料。压电滤波器在外加电压作用下压缩长度，因而填充这样的压电材料的腔长能够随外加电压而改变，进而实现了腔谐振频率的改变。然而压电材料引入了一些不良影响，如热不稳定性和滞后效应，使得难以在实际系统中使用这样的过滤器。

2.3.6 多层介质膜滤波器

薄膜谐振腔滤波器(TFF)是一种法布里-珀罗干涉仪或标准具(见 2.3.5 节)，其中反射镜周围的空腔是通过多层反射介质膜实现的(见习题 2.13)。这一器件起着带通滤波器的作用，它允许一个特定的波长通过而反射其他所有波长信号。直通的波长由腔长确定。

一种薄膜谐振多腔滤波器(TFMF)由两个或多个腔组成，它们用反射介质薄膜层分开，如图 2.18 所示。多腔对滤波器的影响如图 2.19 中响应曲线所示。加入更多的腔使得滤波器通带顶更平坦，通带裙边更陡峭，这两点都是非常理想的滤波特性。

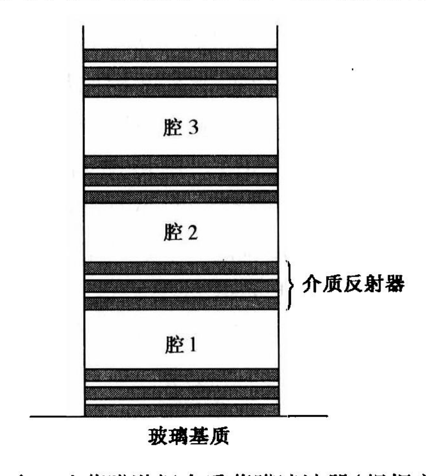


图 2.18 一个三腔薄膜谐振介质薄膜滤波器(根据文献[SS96])

为了制作复用器或解复用器，可以将多个这样的滤波器如图 2.20 所示的那样级联。每个滤波器通过一个不同的波长，而反射所有其他的波长。当用做解复用器时，级联中的第一级滤波器允许一个波长通过，而将其他波长信号反射到第二级滤波器上。第二级滤波器让另一个波长通过，并反射剩余的波长信号，以此类推。

这种器件有许多优点，对系统应用更有吸引力。它可能有非常平坦的通带顶和很陡峭的

裙边。该器件对温度变化极其稳定，具有很低的损耗，并且对信号的偏振不敏感。表2.1给出了一个16信道复用器的典型参数值。由于上述原因，TFMF已经广泛应用于当前的商用系统中。为了理解这些器件的工作原理，需要某些电磁理论的知识，所以将它推迟到附录G中讨论。

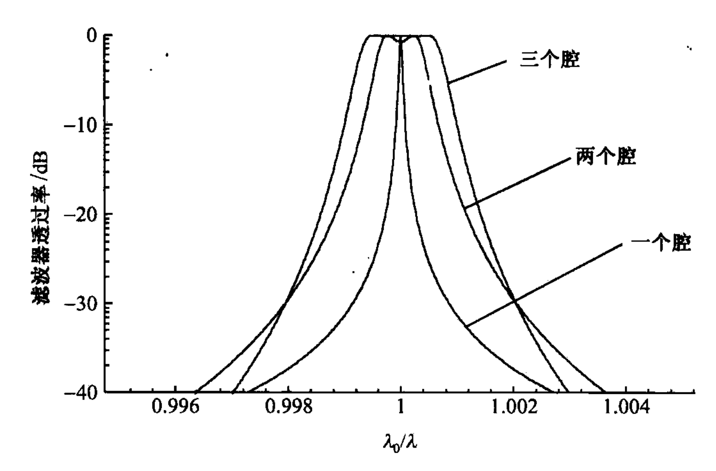


图2.19 一个腔、两个腔和三个腔的介质薄膜滤波器的传递函数。注意如何用多个腔生成较平坦的通带及从通带到阻带形成较陡峭的过渡特性

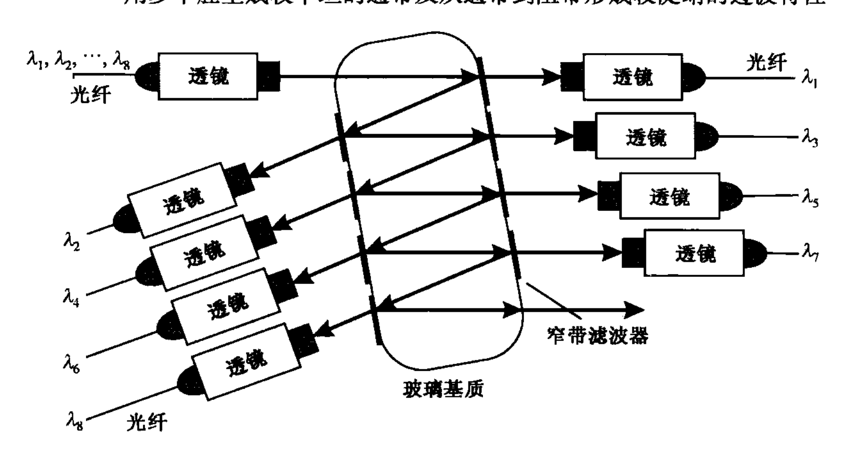


图2.20 一个用多层介质膜滤波器构成的波长复用器/解复用器(根据文献[SS96])

2.3.7 马赫-曾德尔干涉仪

马赫-曾德尔(MZI)干涉仪是一个干涉器件，它利用两条不同长度的干涉路径以分开不同的波长。按照这一原理构造的器件已经有数十年的历史。今天，马赫-曾德尔干涉仪通常用集成光学方法构造，它包括两个3 dB定向耦合器，其通过两条长度不同的路径互相连接在一起，如图2.21(a)所示。衬底通常采用硅材料，而波导和包层采用二氧化硅(SiO_2)材料。

马赫-曾德尔干涉仪(MZI)可以用做滤波器和复用器/解复用器。即使有更好的技术制作窄带滤波器，如介质多腔薄膜滤波器，但是在实现宽带滤波器方面MZI仍然有用。例如，MZI能够将1.3 μm和1.55 μm两个波段中的波长分离。正如我们将看到的，用几级MZI串联可以制作窄带MZI滤波器，但是会导致较大的损耗。原则上，用MZI能够制作串扰性能很

好的器件，只要在设计该器件时将不希望出现的波长安排在功率传递函数的零点或其附近的位置上。然而，实际上波长不能精确确定（例如，由于温度变化或老化引起的波长漂移）。此外，定向耦合器的耦合比不是50:50，而可能与波长有关。其结果将导致串扰性能远达不到理想状态。同时，窄带 MZI 的通带是不平坦的。与此相反，多腔介质薄膜滤波器能够有平坦的通带和良好的阻带。

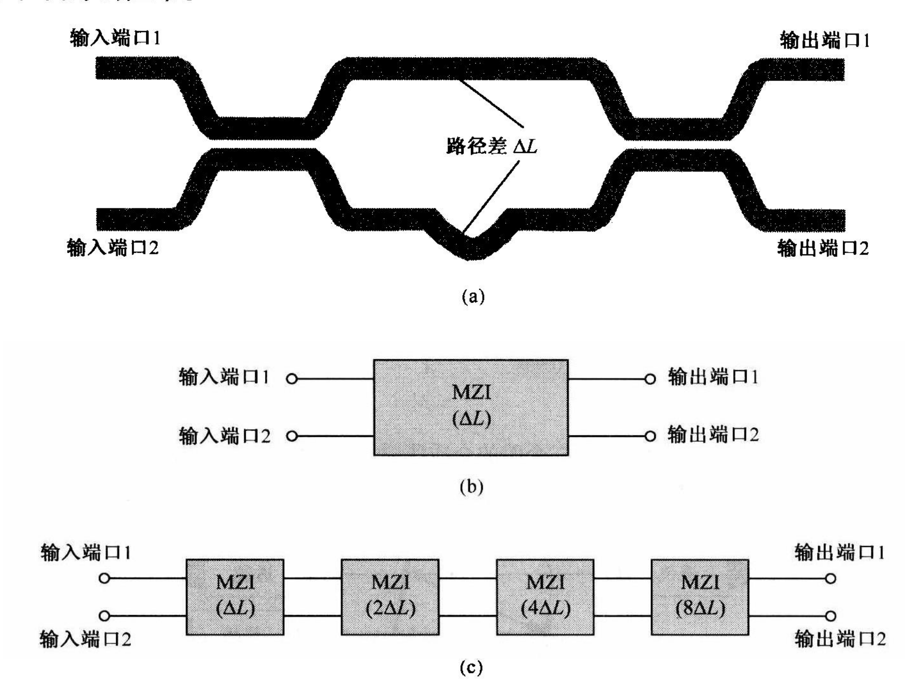


图 2.21 (a) MZI 由互连的两个 3 dB 耦合器构成;(b) 表示图(a)中 MZI 的方框图，ΔL 表示两条臂之间的路径差;(c) 四级MZI的方框图，每一级用了不同的路径差

MZI 可以用做两个输入端口和两个输出端口的复用器和解复用器。它们也可以用做可调谐滤波器，这是通过改变器件其中一臂的温度来实现调谐的。因为温度的变化引起了那个臂的折射率变化，进而影响了两臂之间的相位关系，并导致耦合出一个不同的波长。这一方法所需的调谐时间在数毫秒量级。复用器和解复用器的信道数越多，就要使用当前越好的可用技术。一个例子是下一节将要介绍的阵列波导光栅(arrayed waveguide grating，AWG)。因为了解 MZI 的工作原理有助于理解 AWG，所以下面将首先介绍 MZI 的工作原理。

工作原理

当 MZI 用做解复用器时，只有一个输入端口(如端口 1)有信号输入[见图 2.21(a)]。在输入信号经历第一个定向耦合器后，其功率被平均分配到 MZI 的两条臂中，但其中一条臂中的信号相对于另一条臂中的信号有 $\pi/2$ 相移差。具体地说，下臂中的信号滞后上臂中的信号 $\pi/2$ 相位，如 2.1 节所述。从式(2.1)中可以很好地理解这一点。因为两臂之间存在长度差 ΔL，所以在下臂的信号中引入滞后相位 $\beta\Delta L$。在第二个定向耦合器中，从下臂来的信号在进到第一个输出端口时，相对于上臂来的信号又经受了另一个 $\pi/2$ 相位延迟。因此，在第一个或上输出端口处，两路信号之间总相位差为 $\pi/2+\beta\Delta L+\pi/2$。在输出定向耦合器处，在进到

第二个输出端口时，从上臂来的信号的相位滞后下臂来的信号 $\pi/2$。因此，在第二个或较低的输出端口处，两个信号之间总的相对相位差为 $\pi/2+\beta\Delta L-\pi/2=\beta\Delta L$。

如果 $\beta\Delta L=k\pi$ 且 k 是奇数，则第一个输出端口处两信号同相相加，而在第二个输出端口的信号反相相加，因而互相抵消。这样，从第一个输入端口到第一个输出端口的信号波长满足 $\beta\Delta L=k\pi$ 且 k 是奇数。从第一个输入端口到第二个输出端口的信号波长满足 $\beta\Delta L=k\pi$ 且 k 是偶数。从式(2.14)中 MZI 的传递函数可以很容易地导出这一结论，但该详细的说明将有助于理解阵列波导光栅(见 2.3.8 节)。

假定其中两条路径长度差为 ΔL，并且仅仅一个输入端口(如端口 1)有信号输入，那么能够指出(见习题 2.14)，MZI 的功率传递函数可表示为

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \sin^2(\beta\Delta L/2) \\ \cos^2(\beta\Delta L/2) \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

因此，两臂之间的路径差 ΔL 是表征 MZI 的传递函数的关键参数。在此，将用图 2.21(b)中的方框图表示图 2.21(a)中的 MZI。

现在考虑 k 个 MZI 互连，图 2.21(c)所示的是 $k=4$ 的情况。这样的器件称为多级 MZI。假定级联的 MZI 中第 k 个 MZI 的路径长度差为 $2^{k-1}\Delta L$。这个多级 MZI 中，每一个 MZI 的传递函数及整个滤波器的功率传递函数一起示于图 2.22 中。多级 MZI 的功率传递函数也以分贝(dB)标尺示于图 2.23 中。

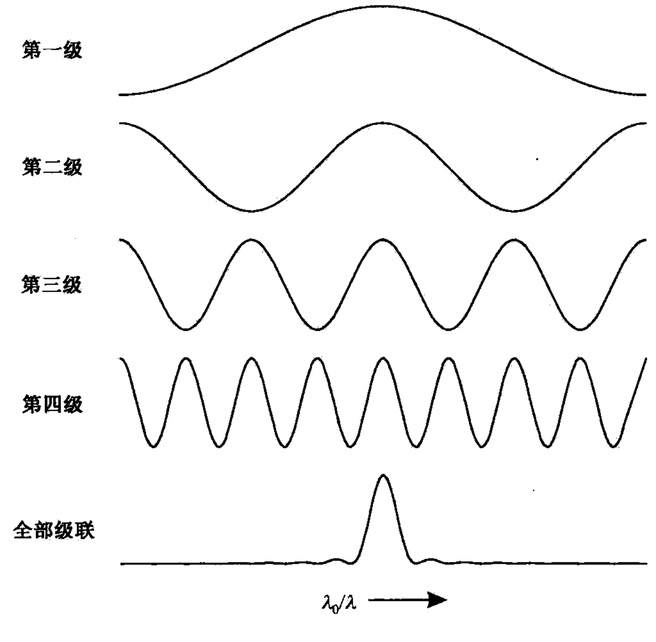


图 2.22 多级马赫-曾德尔干涉仪中每一级的传递函数

现在说明如何将一个 MZI 用做 1×2 解复用器。既然这种器件是互易的，根据电磁场理论，如果将它的输入和输出互换，则它就成为 2×1 复用器。

考虑具有固定路径差 ΔL 的单个 MZI。设输入端口 1 输入波分复用信号，其中的所有波长符合传递函数的峰或谷。为了方便，假定传输常数为 $\beta=2\pi n_{eff}/\lambda$，其中 n_{eff} 为波导的有效

折射率。选择输入波长λ_i，使得$n_{eff}\Delta L/\lambda_i = m_i/2$，其中$m_i$为一些正整数。$m_i$为奇数时，对应的波长信号将出现在第一个输出端口[因为传递函数为$\sin^2(m_i\pi/2)$]；而m_i为偶数时，对应的波长信号将出现在第二个输出端口[因为传递函数为$\cos^2(m_i\pi/2)$]。

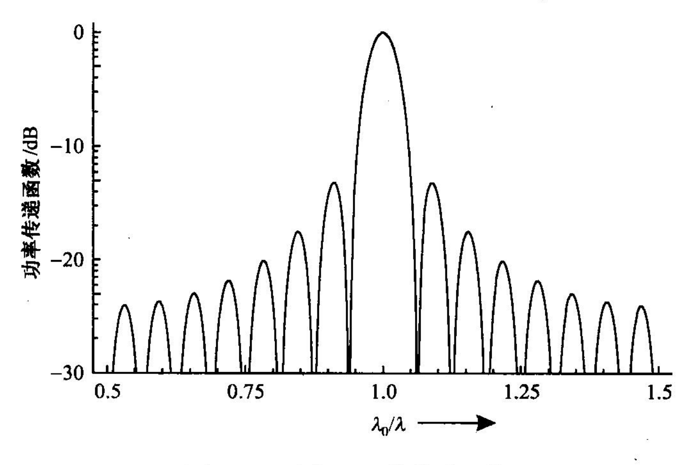


图 2.23 多级 MZI 的传递函数

如果仅有两个波长，一个对应m_i为奇数，而另一个对应m_i为偶数，这样就得到1×2解复用器。当n是2的幂时，则可以用$n-1$个 MZI 构造$1\times n$解复用器，这一问题留下作为练习(习题2.15)。但是存在更好的方法构造信道数更多的解复用器，这将在下面介绍。

2.3.8 阵列波导光栅

阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)是 MZI 的推广。这一器件如图2.24所示。它由波导阵列互连的两个多端口耦合器组成。MZI 能够看做这样一种器件，其中同一信号分成两路，然后经历不同量的相移后再加在一起。而 AWG 则是一种类似的器件，其中同一信号分成多路，然后经历不同量的相移后再加在一起。

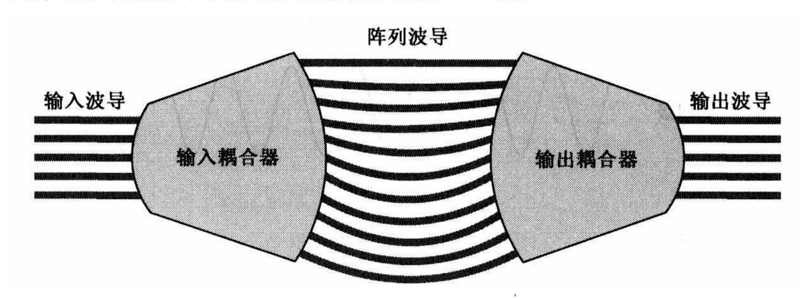


图 2.24 阵列波导光栅

AWG 具有多种应用。它能够被用做$n\times1$波长复用器(wavelength multiplexer)。在这种应用中，它是一个具有n个输入端口和1个输出端口的器件，其中n个输入是不同波长的信号，它们被联合到单一的输出端口。这种功能的逆向应用，即$1\times n$波长解复用(wavelength demultiplexing)也能够用 AWG 实现。虽然这些波长复用器和解复用器也能够通过适当方式互连的 MZI 构成，但人们宁愿使用 AWG。相对于一个 MZI 链，AWG 具有较低损耗和较平的通带，并且容易在集成光学基质上实现。输入和输出波导、多端口耦合器和阵列波导都可在单

一基质上制作。基质材料通常是硅，而波导材料则是二氧化硅、掺杂锗的二氧化硅或二氧化硅-五氧化二钽（SiO_2-Ta_2O_5）。32 信道的 AWG 已经可以买到，而较小的 AWG 已经被用于 WDM 传输系统中。它们的温度系数（0.01 nm/℃）不如与之竞争的技术（如光纤光栅和多层介质膜滤波器）那样低，所以这些器件需要采用有源温度控制。

理解 AWG 用做解复用器工作原理的另一种方法是把多端口耦合器看做透镜，波导阵列看做棱镜。输入耦合器将一条输入波导来的光准直后送到波导阵列。波导阵列起着类似棱镜的作用，提供与波长有关的相移，而输出耦合器将不同的波长会聚到不同的输出波导。

AWG 也能被用做静态的波长互连。然而这种波长互连不能达到任意的路由方式。虽然选择合适波长和器件的 FSR 能够达到几种互连方式，但是最有用的一种表示如图 2.25 所示。该图给出了一种 4×4 静态波长互连，其中使用了四个波长，每一个波长都能从每个输入端口路由到每一个输出端口。

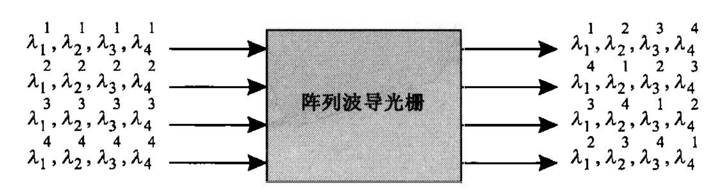


图 2.25 由阵列波导光栅构成的一个静态波长互连器件的交叉互连图案。该器件将一个输入端口来的信号根据信号波长路由到一个输出端口

为了达到这种互连图案，AWG 的工作波长和 FSR 都必须适当选择。在习题 2.17 中导出了 AWG 的 FSR。给定 FSR，确定达到这一图案的波长留下作为另一道习题（习题 2.18）。

工作原理

考虑如图 2.24 所示的 AWG。假设用 n 标记 AWG 的输入和输出端口数。再假设输入和输出耦合器的大小分别为 $n \times m$ 和 $m \times n$。因此，这两个耦合器用 m 条波导互连。这些波导被称为阵列波导（arrayed waveguide），以便将它们与输入和输出波导相区别。选择这些波导的长度，使之相邻波导之间的长度差是一个常数，并用 ΔL 标记。MZI 是 AWG 在 $n = m = 2$ 时的一种特殊情况。现在，要确定哪个波长从给定的输入端口传输到给定的输出端口。第一个耦合器将输入信号分成 m 部分。这些部分的相对相位由耦合器中从输入波导到阵列波导之间的传输距离决定。用 d_{ik}^{in} 表示输入波导 i 和阵列波导 k 之间的行程距离（相对于任一输入波导和任一阵列波导之间的行程距离）的差值。假定阵列波导 k 比阵列波导 $k-1$ 长 ΔL。类似地，用 d_{kj}^{out} 表示阵列波导 k 与输出波导 j 之间行程距离（相对于任一阵列波导和任一输出波导之间的行程距离）的差值。那么，这些信号从输入端口 i 到输出端口 j 遍历它们之间的 m 条不同路径所产生的相对相位为

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 d_{ik}^{\text{in}} + n_2 k \Delta L + n_1 d_{kj}^{\text{out}}), \qquad k = 1, \cdots, m \tag{2.15}$$

式中，n_1 是输入和输出定向耦合器中的折射率，n_2 是阵列波导的折射率。从输入端口 i 来的那些信号中，使 ϕ_{ijk}（$k = 1, \cdots, m$），相差 2π 的整数倍的那些波长 λ 将在输出端口 j 处同相相加。问题是，是否存在这样的波长？

如果输入和输出耦合器设计得使 $d_{ik}^{in} = d_i^{in} + k\delta_i^{in}$ 和 $d_{kj}^{out} = d_j^{out} + k\delta_j^{out}$，则式(2.15)可以写成

$$\begin{aligned}\phi_{ijk} \quad = \quad & \frac{2\pi}{\lambda}(n_1 d_i^{in} + n_1 d_j^{out}) + \\ & \frac{2\pi k}{\lambda}(n_1 \delta_i^{in} + n_2 \Delta L + n_1 \delta_j^{out}), \qquad k = 1, \cdots, m\end{aligned} \tag{2.16}$$

这样的结构是可能实现的，被称为罗兰圆结构(Rowland circle construction)。图2.26画出了这种结构，并将在习题2.16中进一步讨论。因此，从输入端口 i 输入并满足 $(n_1\delta_i^{in} + n_2\Delta L + n_1\delta_j^{out}) = p\lambda$，$p$ 是某些整数的那些波长 λ 将在输出端口 j 处同相相加。

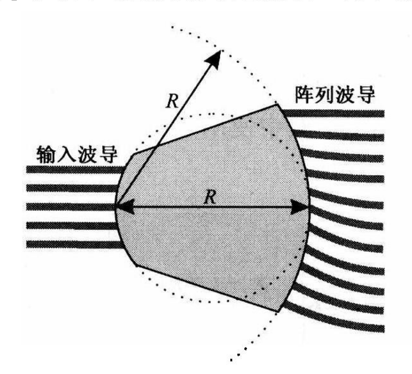


图2.26 在AWG中，用做耦合器的罗兰圆结构。阵列波导被放置在圆弧上，称为光栅圆。光栅圆的中心处在中央输入(输出)波导的端点。设这个圆的半径为R，别的输入(输出)波导处在直径等于R的圆弧上，这个圆称为罗兰圆。选择阵列波导之间的垂直间距为常数

当用做解复用器时，所有波长都会在同一输入端口，如输入端口 i。因而，如果对某些整数 p，WDM系统中的波长 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 满足 $n_1\delta_i^{in} + n_2\Delta L + n_1\delta_j^{out} = p\lambda_j$，则可以从式(2.16)推断这些波长被AWG解复用。注意，虽然在确定精确的一组解复用波长时 δ_i^{in} 和 ΔL 是必需的，但是波长之间的最小间隔却与 δ_i^{in} 和 ΔL 无关，而主要由 δ_j^{out} 决定。

注意，在前述的例子中，如果波长 λ_j' 满足 $n_1\delta_i^{in} + n_2\Delta L + n_1\delta_j^{out} = (p+1)\lambda_j'$，则 λ_j 和 λ_j' 两波长都从输入端口 i 解复用到输出端口 j。因此，如同已经研究过的许多其他滤波器和复用器/解复用器一样，AWG具有周期性(在频率上)响应，并且所有波长必须处在一个自由谱区内。这一自由谱区表达式的推导留下作为练习(习题2.17)。

2.3.9 声光可调谐滤波器

声光可调谐滤波器(acousto-optic tunable filter, AOTF)是一个多功能器件。人们或许只知道它是一个能够同时选择几个波长的可调谐滤波器。这一能力可以被用来构造波长互连，正如本节后面所介绍的那样。

AOTF是基于声光相互作用而构成的几种光器件中的一个例子。其基本原理是，声波被用来在波导上形成布拉格光栅，然后光栅被用来选择波长。图2.27表示了一个简单的AOTF例子。我们将看到这个AOTF的运行依赖于输入信号的偏振态。图2.28表示了一个用集成光学实现的、更实际的、与偏振无关的AOTF装置。

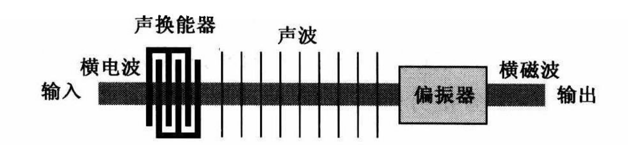


图 2.27 简单的声光可调谐滤波器(AOTF)。声波形成了一个光栅,其节距决定于声波的频率。在满足布拉格条件的波长处,该光栅将一个偏振模的能量耦合到另一偏振模中

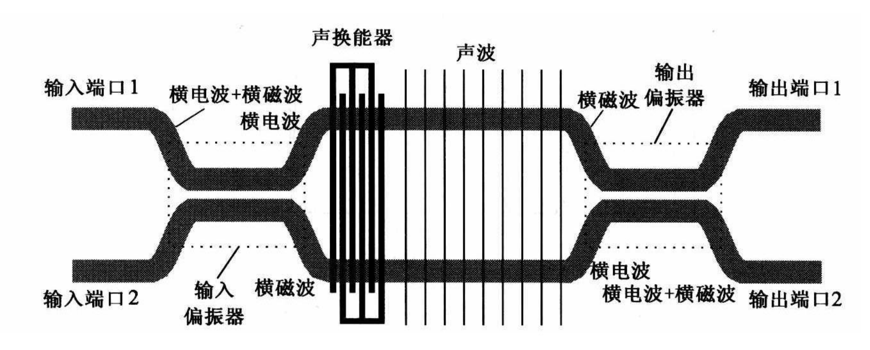


图 2.28 一种偏振无关的集成光学 AOTF。一个偏振器将输入信号分成它的部分偏振模,在输出端合束之前,每个模式在两个分开的臂上相互转换

工作原理

考虑如图 2.27 所示的器件。它包括用双折射材料制作的波导,其中只能传输最低阶 TE 模和 TM 模。假定输入光能量完全在 TE 模。在信道波导的另一端放置一个偏振器,它仅能选择 TM 模光能量。如果在所选波长附近一个窄的频谱范围内的光能量以某种方式转换成 TM 模,而其他频谱范围的光能量仍保持在 TE 模,则可得到一个波长选择滤波器。在 AOTF 中,只要沿着光波传输方向或沿相反方向发送一列声波,就能实现这一转换。

作为声波传播的结果,介质的密度产生周期性的变化。密度变化的周期等于声波的波长。该密度周期性变化起着布拉格光栅的作用。从 2.3.3 节关于这种光栅的讨论中可以得到,如果 TE 和 TM 模的折射率 n_{TE} 和 n_{TM} 满足布拉格条件

$$\frac{n_{\mathrm{TM}}}{\lambda} = \frac{n_{\mathrm{TE}}}{\lambda} \pm \frac{1}{\Lambda} \tag{2.17}$$

则光波从一个模式耦合到另一个模式。所以,满足式(2.17)的波长 λ 附近一个窄频谱范围内的光能量经历了 TE 模到 TM 模的转换。所以,只当输入 TE 模光能量及只当 TM 模的光能量被选出至输出端口时,该件起着窄带滤波器的作用,如图 2.27 所示。

在 $\mathrm{LiNbO_3}$ 中,TE 模和 TM 模的折射率 n_{TE} 和 n_{TM} 相差大约 0.07。如果用 (Δn) 表示这一折射率差,则布拉格条件式(2.17)能够写成

$$\lambda = \Lambda(\Delta n) \tag{2.18}$$

通过适当选择声波波长 Λ,经受过模式转换并处于 AOTF 通带内的波长可以被选出或调谐。为了在 $(\Delta n) = 0.07$ 时选出 1.55 μm 波长,利用式(2.18)可得声波波长大约为 32 μm。由于铌酸锂中声速大约为 2.75 km/s,相应的射频(RF)频率大约为 170 MHz。由于 RF 频率容易调谐,滤波器选择的波长也容易调谐。器件典型的插入损耗大约为 4 dB。

这里考虑的 AOTF 是一种偏振相关的器件，因为假定输入光能量完全处在 TE 模。能够采用与偏振无关隔离器完全同样的方式实现如图 2.28 所示的偏振无关 AOTF，即将输入信号分解为 TE 和 TM 分量，并且将每一个分量分别传送给 AOTF，然后在输出处再将它们重新组合。

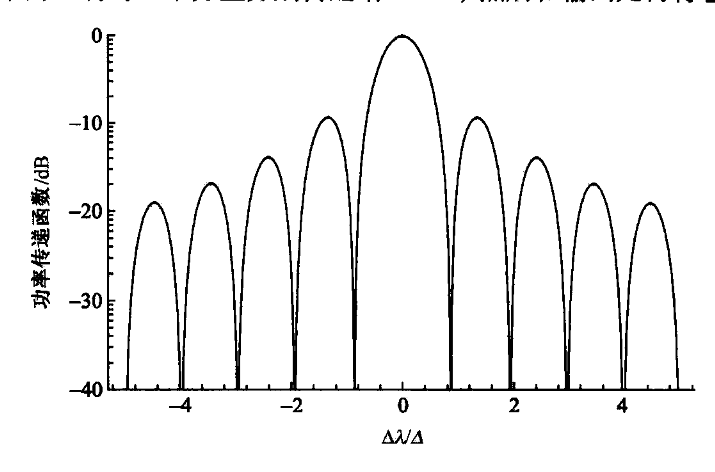


图 2.29 声光可调谐滤波器的功率传递函数

传递函数

尽管布拉格条件决定了滤波器所选的波长，但是滤波器通带宽度是由声光相互作用长度决定的。相互作用长度越长，器件的通带越窄。可以证明，由 AOTF 传送的那部分功率的波长依赖性为

$$T(\lambda)=\frac{\sin^2\left((\pi/2)\sqrt{1+(2\Delta\lambda/\Delta)^2}\right)}{1+(2\Delta\lambda/\Delta)^2}$$

该函数曲线画在图 2.29 中。其中，$\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$，$\lambda_0$ 是满足布拉格条件的光波长，$\Delta=\lambda_0^2/l\Delta n$ 衡量该滤波器的通带宽度；l 是器件的长度(或者更准确地说，是声光相互作用的长度)。能够证明，该滤波器的半高全宽(FWHM)带宽约等于 0.8Δ(习题 2.20)。这一方程清楚地表明，器件越长，通带越窄。然而，这里有一个折中：调谐速率反比于长度 l。这是因为调谐速率基本上是由声波通过滤波器长度所需的时间决定的。

AOTF 用做波长交叉互连器件

图 2.28 所示的偏振无关的 AOTF 可以用做双输入、双输出的动态波长交叉互连器件。在前面研究了这种器件作为滤波器的工作原理，在这种情况下只有一个输入端口有信号输入。它将留下作为练习(习题 2.21)，证明当第二个端口也有信号输入时，满足布拉格相位匹配条件(2.18)的波长 λ 的信号能量在两个端口之间进行交换。图 2.30(a)说明了这一情况，其中波长 λ_1 满足布拉格条件，并且在端口之间进行交换。

现在，AOTF 具有一个值得注意的特点，这一特点不是任何其他已知的可调谐滤波器结构所共有的。同时发送多个声波进入 AOTF，则多个光波长可以同时满足布拉格条件(2.18)。因此，用图 2.28 所示形式的单个器件可以同时实现两个端口之间多个波长的交换。图 2.30(b)说明了这种情况，其中 λ_1 和 λ_4 在端口之间交换。因此，该器件实现了与图 2.7 的静态交叉互连器件同样的路由功能。然而，AOTF 是一种完全通用的双输入、双输出动态交叉互连器件，只要改变馈入器件的声波频率，就能改变路由模式，或者交换波长集。

原则上，更大规模的动态交叉互连(有更多的输入和输出端口)可以用适当级联 2×2 交叉互连器件构造。然而，在2.7节中将看到有更好的方法构建大规模交叉互连器件。

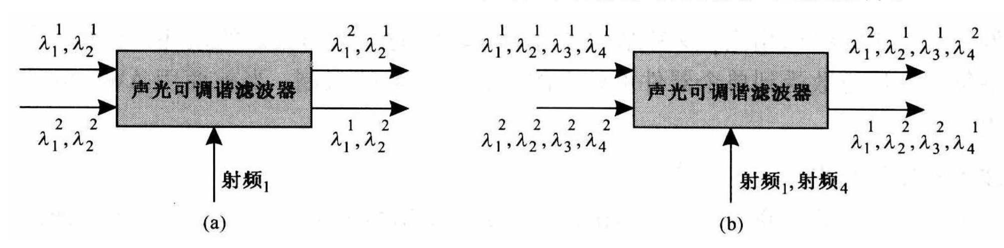


图2.30 用声光可调谐滤波器构建的波长交叉互连器件：(a)波长λ_1在两端口之间交换；(b)同时注入两个适当的声波可同时实现波长λ_1和λ_4在两端口之间交换

在写作本书时，AOTF还没有实现其用做多功能可调谐滤波器或者波长交叉互连器件的设想。一个原因是器件中存在很高的串扰。正如从图2.29中看到的，它的功率传递函数中第一旁瓣甚至不能比器件的峰值低10 dB。将两个这样的滤波器级联，可以一定程度上减轻这一问题。事实上，可以在单一基质材料上实现这样的级联。而且第一旁瓣可能正好低于峰值20 dB。但是，级联更多的这类器件而不遇到其他问题是很难的，例如，传输损耗可能高到不能接受的程度。今天AOTF较不成功的另一个原因是它的通带相当宽(100 GHz或者更宽)，甚至当声光可调谐滤波器相互作用长度大约1英寸时仍然过宽(习题2.22)。这就使得它不适合用于密集波分复用系统，其中信道间隔现在已降到50 GHz。相互作用长度更长的器件更难制造。然而，近期的一些理论工作[Son95]表明，上述某些问题可能得到了解决，特别是串扰问题。在文献[Jac96]中详细讨论了AOTF用做波长交叉互连时所引起的串扰问题。

2.3.10 多信道数复用器结构

随着波长数持续地增加，设计用以处理大量波长的复用器和解复用器已经成为重要的问题。这些器件应有的特性和在2.3节前面部分看到的一样。下面的讨论是针对解复用器而进行的，但是这些解复用器都能用做复用器。事实上，在双向应用中，一些波长在一个方向通过光纤传输，而另一些波长在相反方向通过同一光纤传输，这样，同一器件对一些波长起着复用器的作用，而对另一些波长起着解复用器的作用。下面将介绍几种构建多信道数解复用器的方法。

串联结构

在这一方法中，解复用器每次只解复用一个波长。解复用器包括W级串联的滤波器，每一级对应于W个波长中的一个波长。每一级滤波器解复用一个波长并让其余的波长通过。图2.20所示的介质薄膜解复用器就是这类器件的一个例子。这种结构的一个优点是，当需要增加更多波长时，它可每次增加一级滤波器。这允许采用"按需付费"的方式。

串联结构应用于解复用信道数相对较少的情况，而不能用于处理大量信道数。这是因为解复用器的插入损耗(dB)几乎线性地随着被解复用的信道数增加而增加，而且基于波长被解复用的次序，不同信道的插入损耗也不同。这不是我们所希望有的特性。

单级结构

在这种情况下，所有波长在单级中一起被解复用。图 2.24 所示的 AWG 就是这样结构的一个例子。与串联结构相比，这种结构具有相对较低的损耗和更好的损耗一致性。然而，能够被解复用的信道数受到单个器件可处理的最大信道数的限制，当前商用 AWG 的信道数大约是 40。

多级波带解复用结构

由于上面讨论的串联和单级结构的限制，更多信道数要求多级解复用。当今使用的一种流行的方法是将所有波长分成波带。例如，全部 32 个波长可以分成 4 个波带，每个波带包括 8 个波长。解复用分两级进行，如图 2.31 所示。在第一级全部波长被解复用到几个波带。在第二级，波带被解复用以提取各个波长。这一方案同样可推广到多于两级。这是一种模块化的方法，即在第二级(或者在多级方案中的最后一级)中的解复用器能够一次增加一个波带。

波带解复用结构的一个缺点是通常需要在波带之间留一个"保护"间隔，如图 2.31 所示。这一保护间隔使得第一级滤波器设计成能够提供足够的串扰抑制，而且保持低插入损耗。

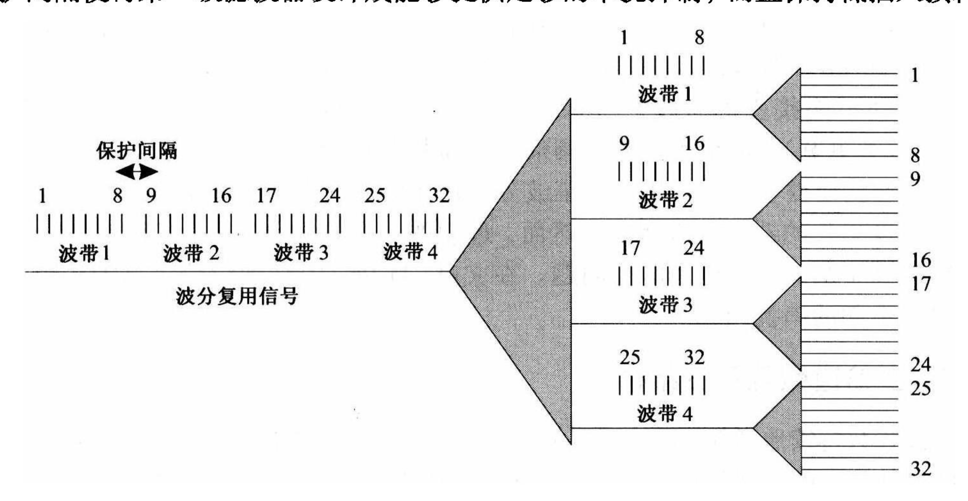


图 2.31　两级波带解复用结构。用 4 个波带、每个波带包含 8 个波长，组成 32 信道解复用器

多级间插结构

间插提供了另一种实现多信道数解复用器的方法。图 2.32 示出了一个两级间插器。在这种结构中第一级将波长分成两组。第一组包含波长 1，3，5，…，而第二组包含波长 2，4，6，…。在第二级中提取各个波长。这种方法也是模块化的，即在该种结构中，解复用器的最后一级能够按照需要扩展。如果需要的话，同样可以使用两级以上的结构。

该方法的一个重要的优点是，最后一级的滤波器可以有比信道宽度宽得多的带宽。作为一个例子，假定希望解复用 32 个信道，其间隔为 50 GHz。在第一级解复用后，信道间隔是 100 GHz，如图 2.32 所示。所以，在第二级能够使用更宽的适于 100 GHz 间隔信道的解复用器。与此对照，单级或者串联方案需要使用 50 GHz 间隔信道的解复用器，这是更难制造的。进一步考虑这一例子，第二级本身又可以由两级组成。其中第一级每隔 100 GHz 提取一个信道，在这一级后信道间隔是 200 GHz。那么，最后一级就能够使用更宽的滤波器来提取逐个信道。这一方法的另一个优点是，在规划信道时不需要保护间隔。

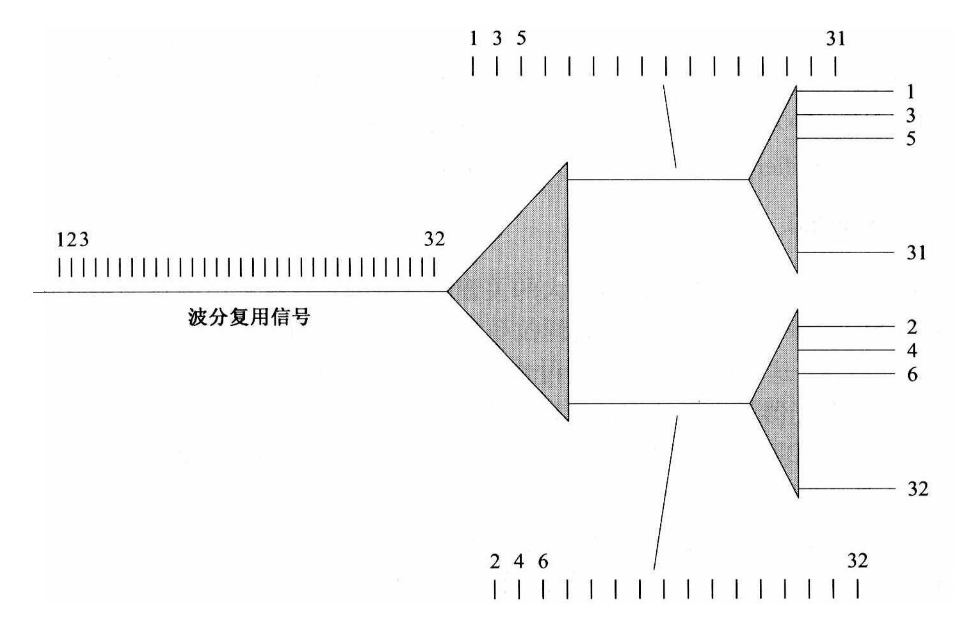


图2.32 使用间插方法的两级复用结构。在这32信道解复用器中，第一级提取每个交替的波长，第二级提取出各个波长

对间插方法的挑战是实现各级解复用器，除最后一级外，它们能够在各级完成间插。原则上，任何周期性滤波器都能够用做间插器件，只要将它的周期与所需的信道间隔相匹配。例如，基于马赫-曾德尔干涉仪的滤波器是一个常见的选择。现在这些器件已有商用产品，并且间插方法正成为实现多信道数的复用器和解复用器的一种流行方法。

2.4 光放大器

在光通信系统中，从发射机发出的光信号在通过光纤传输时受到光纤的衰减。别的光器件，如复用器和耦合器也附加了损耗。经过一定距离后，信号强度的累积损失使得信号变得太弱，从而很难检测到。在问题出现前，信号强度必须恢复。在过去10年，光放大器出现之前，解决这一问题的唯一选择是再生信号，即先接收信号，处理后再发送出去。这一过程用再生器(regenerator)实现。再生器首先将光信号转换成电信号，清除掉各种干扰，恢复原信号，最后再转换成光信号，以便继续向前传输。

与再生器比较，光放大器具有几个优点。一方面，再生器只能用于通信系统使用的某一特定的比特率和调制格式。另一方面，光放大器对比特率和调制格式不敏感。因此，使用光放大器的系统能够更容易升级，例如，不需要替换放大器就可以升级到更高比特率。与此对照，在使用再生器的系统中，同样的升级需要替换所有的再生器。此外，光放大器具有相当大的增益带宽，以至于一个放大器可以同时放大几个WDM信号。与此对照，一个波长需要一个再生器。因此，光放大器已经成为高性能光通信系统中必不可少的器件。

然而，放大器不是一种完美的器件。它们引入了附加噪声，由于放大器的类似性质，信号沿着传输路径通过多个放大器时将会对这种噪声产生累积。在用于系统时，放大器的增益谱形状、输出功率和瞬态行为都是需要考虑的重要问题。理想情况下，希望放大器具有高的

输出功率，以满足网络应用时的需要。也希望放大器增益在工作波长范围内是平坦的，并且对输入功率的变化不敏感。这里，只探讨放大器的工作原理。

我们将讨论三种不同类型的放大器:掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier)、拉曼放大器(Raman amplifier)和半导体光放大器(semiconductor optical amplifier)。

2.4.1 受激发射

在所考虑的所有放大器中，信号放大的关键物理基础是在存在电磁场的情况下原子辐射的受激发射(Stimulated Emission)。(光纤拉曼放大器和光纤布里渊放大器不是这种情况，它们采用光纤非线性，这些问题不在这里讨论。)在光放大器的情况下，电磁场就是光信号场。受激发射同样是激光器工作所依据的原理，激光器的问题将在2.5.1节中讨论。

根据量子力学原理，任一物理系统(例如，一个原子)都处于许多分离的能级中的一个能级上。据此，考虑一个原子和它的两个能级，E_1 和 E_2，并且 $E_2 > E_1$。当电磁场频率 f_c 满足 $hf_c = E_2 - E_1$ 时，它能引起原子在能级 E_1 和 E_2 之间跃迁。其中，h 是普朗克常数(6.63×10^{-34} Js)。图2.33描述了这一过程。可以实现两种跃迁：$E_1 \to E_2$ 和 $E_2 \to E_1$。$E_1 \to E_2$ 跃迁伴随着注入电磁场的光子的吸收。$E_2 \to E_1$ 跃迁伴随着能量为 hf_c 的光子的发射，这一能量和注入光子的能量相同。这一过程称为受激发射，以便与称为自发发射(spontaneous emission)的另一类发射相区别，下面将要讨论后一种发射。因此，如果受激发射占有优势，并超过受激吸收，即注入信号引起的 $E_2 \to E_1$ 跃迁比 $E_1 \to E_2$ 跃迁多——这就得到能量为 hf_c 的光子数的净增加，也即得到信号的放大。否则，信号将被衰减。

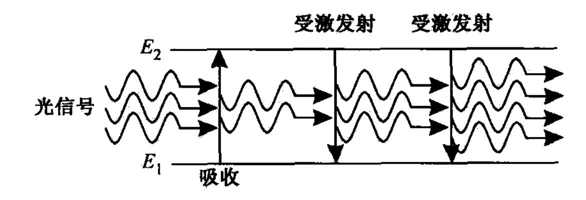


图2.33 一个两能级原子系统中的受激发射和受激吸收

根据量子力学理论，每个光子的 $E_1 \to E_2$ 跃迁速率等于每个光子的 $E_2 \to E_1$ 跃迁速率。设 r 标记这一常用的速率。如果在能级 E_1 和 E_2 的布居数(原子数)分别为 N_1 和 N_2，就能得到功率(每单位时间的能量)的净增加为 $(N_2 - N_1)rhf_c$。很明显，为了实现放大，这一数值必须是正的，即 $N_2 > N_1$，这一条件是著名的布居数反转(population inversion)。这样称呼这一术语的原因是，在热平衡条件下，较低能级的布居数较高，即 $N_2 < N_1$，因而在热平衡条件下只有输入信号的吸收。为了实现放大，必须使热平衡时成立的能级 E_1 和 E_2 的布居数之间的关系反转。

以适当形式外加附加能量，从而将电子泵浦到较高能级，就能达到布居数反转。这一附加能量可以是光形式的，也可以是电形式的。

2.4.2 自发发射

在叙述不同形式放大器的工作原理之前，理解自发发射的影响是必要的。再次考虑前面讨论的具有两能级的原子系统。处于能级 E_2 的原子，在与可能存在的任何外部辐射无关的情况下跃迁到较低能级 E_1，并发射一个能量为 hf_c 的光子。每个从能级 E_2 到能级 E_1 的原子

的自发发射率是系统的一个特征量，它的倒数记为τ_{21}，称为自发发射寿命(spontaneous emission lifetime)。因此，如果在能级E_2上有N_2个原子，则自发发射速率为N_2/τ_{21}，并且自发发射功率为hf_cN_2/τ_{21}。

自发发射过程(在一阶条件下)对放大器的增益没有贡献。虽然发射的光子与注入光信号的光子具有相同能量hf_c，但是它们的发射方向、偏振和相位都是随机的。这一点不像受激发射过程，其中发射的光子不但具有与注入光子相同的能量，而且具有相同的传输方向、相位和偏振。通常，描述这一现象是认为受激发射过程是相干的，而自发发射过程是不相干的。

自发发射对系统是有害的。放大器把自发发射辐射当做除入射光信号外的另一个频率为f_c①的电磁场，并且自发发射也得到放大。在放大器输出处，这一放大的自发发射(amplified spontaneous emission，ASE)作为噪声出现。此外，在某些放大器设计中，ASE可能大到使放大器饱和。

2.4.3 掺铒光纤放大器

图2.34显示了一个掺铒光纤放大器。它包含一段硅光纤，其纤芯用稀土元素饵的电离原子(离子)Er^{3+}掺杂。这种光纤可用激光器的泵浦信号进行泵浦，泵浦信号的典型波长为980 nm或1480 nm。为了将泵浦激光器的输出与输入信号合波，在掺铒光纤前面放置一个波长可选耦合器。

如果需要将放大的信号与任何残留的泵浦信号功率分离，可以在输出处应用另一个波长可选滤波器。通常，在放大器的输入和/或输出处放置一个隔离器，用以防止反射信号进入放大器。在2.5节中将看到，反射可能将放大器转变成激光器，从而使放大器不稳定。

几个因素的共同作用已经使得EDFA被选择作为当今光通信系统中的放大器：(1)已有小型、可靠的高功率半导体泵浦激光器；(2)它是一个全光纤器件，可使它与偏振无关，并且易于将光信号耦合进出放大器；(3)器件很简单；(4)当放大WDM信号时，它不会引起信道间串扰。最后一点将在后面关于半导体光放大器那一部分内容中进行讨论。

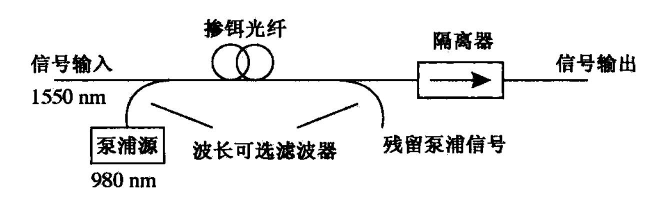


图2.34 掺铒光纤放大器

工作原理

图2.35表示了硅玻璃中铒离子的三个能级，并按能量增加的顺序标记为E_1、E_2和E_3。图中没有表示出Er^{3+}中其他几个能级。当铒离子加入硅玻璃中时，在孤立的铒离子中分立的线表示的每个能级将分裂成多个能级。这一过程称为斯塔克分裂(Stark splitting)。此外，玻璃不是晶体，没有规则的结构。因此，引起的斯塔克分裂的能级略微不同于单个的铒离子，并依赖于那些离子的局部环境。从宏观上看，即当看做离子集合时，就会存在

① 原著中为hf_c——译者注。

这样一种效应，将一个铒离子的每个分立能级分散成一个连续的能带(energy band)。这种能级的分散对于光放大器是一个有用的特性，因为它们增加了能够放大的信号的频率或波长范围。在每个能带内，铒离子以不均匀的样式分布在能带内不同的能级中，这一过程就是众所周知的热化过程(thermalization)。正是由于热化过程使得放大器有能力同时放大多个波长。注意，斯塔克分裂标记这样一种现象：当离子进入硅玻璃时，自由铒离子的能级分裂成许多能级，或者进入一个能带。热化过程表示铒离子分布在组成一个能带的不同(分裂)能级中的过程。

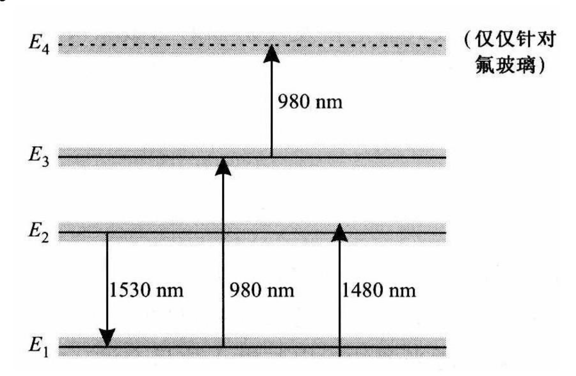


图2.35 在硅玻璃中，Er^{3+}离子的三个能级为E_1、E_2和E_3。第四个能级E_4存在于氟玻璃中但不是在硅玻璃中。由于斯塔克分裂过程，能级都被分散成能带。能级之间的差用与它相对应的光子的波长标记，其单位用nm。向上的箭头表示能够泵浦放大器，以激励离子到更高能级的波长。980 nm波长的跃迁相应于能级E_1和E_3之间的带隙。1480 nm波长跃迁相应于E_1能带的底到E_2能带的顶之间的带隙。向下的跃迁表示由于自发发射和受激发射所发射的光子的波长

回忆关于两能级原子系统的讨论，在那种情况下，只有满足$hf_c = E_2 - E_1$的频率f_c的光信号能够被放大。如果这些能级分散成能带，相应于E_2能带中的某个能量和E_1能带中某个能量之间差的所有频率都能被放大。在硅玻璃中铒离子的情况下，能够被E_2能带到E_1能带的受激发射放大的频率系列相应于1525～1570 nm的波长范围，具有50 nm的带宽，其峰值在1532 nm附近。很幸运，这正好是用于光通信系统的标准光纤的低损耗窗口之一。

用N_i标记能级E_i的离子布居数，$i = 1,2,3$。在热平衡情况下，$N_1 > N_2 > N_3$。从E_2到E_1的受激发射的布居数反转条件是$N_2 > N_1$，吸收并结合随之的自发发射就能达到这一条件。在E_1和E_3之间的能量差相应于波长980 nm。所以，如果波长980 nm的光功率——称为泵浦功率(pump power)——注入放大器，这将引起E_1到E_3的跃迁或者相反过程。由于$N_1 > N_3$，因此将有对980 nm功率的净吸收。这一过程称为泵浦。

已经被这一过程提升到E_3能级的离子将由自发发射过程快速跃迁到E_2能级。这一过程的寿命τ_{32}大约是1 μs。自发发射过程E_2能级上的原子也将跃迁到E_1能级，但是这一过程的寿命τ_{21}大约是10 ms，比E_3到E_2的寿命长得多。此外，如果泵浦功率足够大，跃迁到E_1能级的离子再次快速提升到E_3能级，以至于再跃迁到E_2能级。净效果是大多数离子处在E_2能级，因此实现了E_1和E_2能级之间的布居数反转。因而，如果同时有1525～1570 nm频带中的信号注入光纤，则它将被E_2到E_1能级的受激发射放大。

除E_3能级外，还有几个高于E_2的能级，原则上这些能级也能用来泵浦放大器。但是，

980 nm 波长比一些其他波长的泵浦过程更有效，即可以用较小的泵浦功率达到给定的增益。泵浦波长的另一个可能的选择是 1480 nm。这一选择相应于从 E_1 能带中的底部子能级到 E_2 能带本身的顶部子能级的吸收。1480 nm 泵浦不如 980 nm 泵浦有效。而且，用 1480 nm 泵浦能够达到的布居数反转度较低。布居数反转程度越高，放大器的噪声系数越低。因此，为了实现低噪声放大器，980 nm 泵浦应该是首选方案。然而比较 980 nm 泵浦激光器，1480 nm 泵浦激光器具有更高的泵浦功率①，因此，可以在提供高输出功率的放大器设计中应用 1480 nm 泵浦。1480 nm 泵浦的另一个优点是，泵浦功率也能在传输信号的硅光纤中低损耗传输，因而泵浦激光器可以放在远离放大器本身的位置。这一性质可以用在一些系统中，以避免在链路的中间放置任何有源器件。

增益平坦

由于在一个波带内不同能级处的布居数水平不相同，EDFA 的增益成为波长的函数。在图 2.36 中，画出了一个典型的 EDFA 的增益作为波长的函数曲线，其中各条曲线对应不同的泵浦功率值。当在 WDM 通信系统中使用这样的 EDFA 时，不同的 WDM 信道将经受不同程度的放大。这是一个关键问题，特别是在带有级联放大器的 WDM 系统中问题更严重。

改进放大器增益曲线平坦性的一条途径是采用掺铒氟玻璃光纤代替硅光纤[Cle94]。这样的放大器称为掺铒氟光纤放大器(EDFFA)。与硅玻璃比较，氟玻璃产生了一条天然平坦的增益谱。然而，使用氟玻璃也存在一些缺点。EDFFA 的噪声性能比 EDFA 差。一个原因是前者必须使用 1480 nm 泵浦，不能使用 980 nm 泵浦。这是因为氟玻璃具有一个高于能级 E_3 的附加的较高能级 E_4，如图 2.35 所示，这两个能级之间的能量差正好相应于 980 nm 波长。这就导致 980 nm 泵浦功率被 E_3 到 E_4 的跃迁所吸收，这一跃迁不能产生有用的增益。这一现象称为激发态吸收(excited state absorption)。

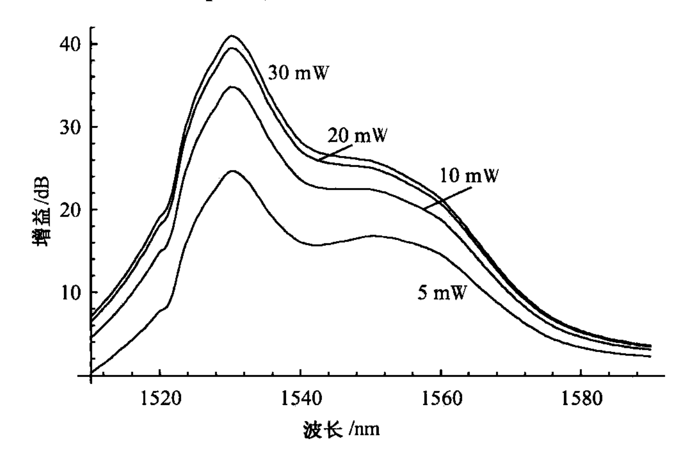


图 2.36 通过模拟获得的一个典型的 EDFA 的增益作为波长的函数曲线，其中用了4个不同的泵浦功率。假定掺杂光纤的长度为15 m，泵浦波长为980 nm

① 目前，高功率的 980 nm 泵浦激光器已经成为商品——译者注。

除这一缺点外，氟光纤本身很难处理。它容易碎裂，难以与普通光纤熔接，易受湿气影响。虽然这样，当前 EDFFA 已经成为商业上可以买到的器件。

EDFA 增益平坦化的另一个方法是在放大器中使用滤波器。EDFA 在 1532 nm 处有一个相当高的峰值增益，在放大器内部使用一个与此波长区相应的陷波滤波器就能够降低这一峰值。2.3 节中介绍的一些滤波器可以用于这一目的。长周期光纤光栅和介质薄膜滤波器通常是这一应用的优选器件。

多级设计

实际上，在实际系统中采用的大多数放大器都比图 2.34 所示的简单结构复杂。图 2.37 显示了一个更普遍使用的两级结构设计。两级分别采用不同的优化设计方法。第一级的设计应提供高增益和低噪声，而第二级的设计应提供高的输出功率。整个放大器的噪声性能主要由第一级决定。因此，这样的组合给出了一个具有低噪声和高输出功率的高性能放大器。在设计中的另一个重要考虑，是在放大器中泵浦源失效时提供冗余，泵浦源是放大器中仅有的有源器件。如图 2.37 所示，放大器中使用了两个泵浦源，这样其中一个泵浦源的失效仅对系统性能产生较小的影响。两级设计的另一个优点是，在两级之间放置的有损耗元件对性能影响可以忽略。有损耗元件可以是增益平坦滤波器、简单的光分插复用器，或者是用来补偿链路上积累色散的色散补偿模块。

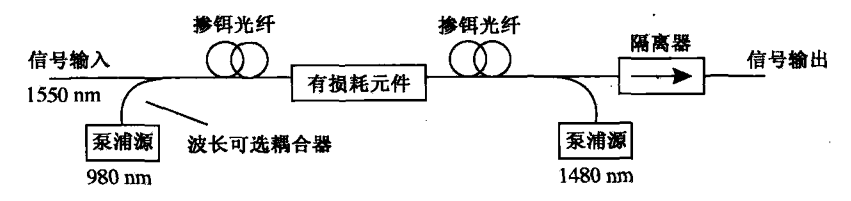


图 2.37 一种两级掺铒光纤放大器，在第一级与第二级之间插入了一个有损耗元件

L 波段 EDFA

至今主要集中讨论了工作于 C 波段(1530 ~ 1565 nm)的 EDFA。然而，掺铒光纤的增益谱形状具有相当长的尾巴，可超过上述范围直扩展到大约 1605 nm。这一点已促进被称为 L 波段(1565 ~ 1625 nm)系统的开发。注意，当前的 L 波段 EDFA 还没有覆盖这个波段的顶部(1610 ~ 1625 nm)区域。

L 波段 EDFA 的工作原理和 C 波段 EDFA 一样。然而，L 波段和 C 波段的 EDFA 设计有着重要的差别。铒的固有增益谱在 L 波段比 C 波段平坦得多。这就使得更容易设计 L 波段的增益平坦滤波器。然而，L 波段的铒增益系数只有 C 波段的三分之一。这就需要使用长得多的掺杂光纤，或者使用的光纤中具有更高的铒离子浓度。在以上两种情况下，L 波段 EDFA 所需要的泵浦功率比 C 波段高得多。由于 L 波段较小的吸收截面，因此这些放大器也具有较高的放大的自发发射噪声。最后，在放大器中使用的其他元件，如隔离器和耦合器，都表现出具有与波长有关的损耗，因而对于 L 波段和 C 波段需要使用不同特性的专用元件。还有几个别的有关 L 波段放大器的细微区别，有关概述，请参见文献[Flo00]。

由于 C 波段和 L 波段放大器之间的这些重要的差别，因此这些放大器通常使用不同的器件而不是单一的器件来实现。在实际的系统应用中，首先用一个解复用器将光纤中的 C 波段和 L 波段的波长分开，然后分别用不同的放大器放大，最后再合在一起。

2.4.4 拉曼放大器

受激拉曼散射作为一种非线性损伤，影响信号在光纤中的传输。这同一的非线性效应也可以被开发用以提供放大功能。拉曼增益谱是相当宽的，增益峰值的中心大约比所使用的泵浦信号频率低 13 THz。在我们感兴趣的近红外区域内，这一频率差相当于大约 100 nm 的波长间隔。因而，使用高功率泵浦激光器泵浦光纤，就能对别的信号提供增益，在低于泵浦频率 13 THz 的频率处获得峰值增益。例如，用大约 1460 ~ 1480 nm 波长的泵浦源就能在 1550 ~ 1600 nm 窗口提供拉曼增益。

拉曼放大器的一些关键特性与 EDFA 不同。不像 EDFA，拉曼效应可以在任一波长处提供增益。而 EDFA 只能在 C 波段和 L 波段(1528 ~ 1605 nm)处提供增益。因此，拉曼放大效应能够具有为 WDM 技术开拓别的波段的潜力，例如，开拓 1310 nm 窗口，或者开拓正好处在低于 1528 nm 波长的、被称为 S 波段的波段。此外，能够同时使用多个不同波长和不同功率的泵浦源，用以缝合所需要的整个拉曼增益谱形状。

其次，只要对传输数据信号用的同一硅光纤进行泵浦，就可产生拉曼放大，以至于可以用它制作集总的或分立的放大器，也可以制作分布式放大器。在集总的情况下，拉曼放大器包括封装在一起的有一定长度的光纤线轴和适当的泵浦激光器。在分布式情况下，光纤就是那段感兴趣的光纤段及放在这一段一端的泵浦源，如图 2.38 所示。

当前，在超长跨距的系统中，普遍使用拉曼放大器来增强 EDFA，提供分布的附加增益[①]。实现拉曼放大器的最大挑战是泵浦源本身。这些放大器需要适合波长的、输出功率的 1W 量级或更高功率的泵浦源。实现这些泵浦源的一些技术将在 2.5.5 节中研究。

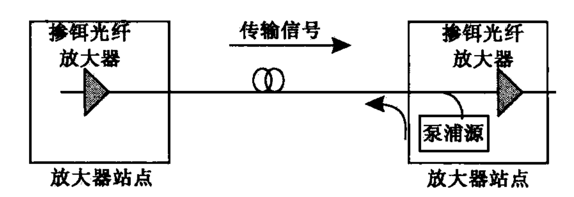


图 2.38 使用反向泵浦的分布式拉曼放大器，该放大器与分立的掺铒光纤放大器一起工作

拉曼放大器中的噪声来源也与 EDFA 有些不同。拉曼增益对泵浦功率的响应是瞬时的，因此，泵浦功率的起伏也将引起增益的变化，并将表现为对需要的信号的串扰。在 EDFA 中，没有这种情况。在 2.4.6 节中将看到，在那些器件中增益的响应时间是很慢的，大约毫秒量级。因而，对于拉曼放大器，保持泵浦源的功率恒定是很重要的。泵浦波沿着与信号相反方向传输有着特别的好处，因为泵浦功率的起伏在光纤传输时间内被平均，从而减小了影响。为了理解这一点，首先考虑泵浦波与信号同向传输的情况。两列波以近似相同的速度行进。在这种情况下，当输入处泵浦功率很高时，信号得到了高增益，而当功率较低时信号得到较低的增益。现在考虑信号和泵浦反向行进的情况。为了简化，假定泵浦功率在高功率和低功率两种状态之间变化。当信号通过光纤传输时，在与高功率状态的泵浦信号重叠时得到高增益，在与低功率状态的泵浦信号重叠时得到低增益。如果与信号跨过光纤

① 现今已有单独使用拉曼放大器的超长跨距的系统——译者注。

的传输时间相比泵浦起伏相当快，则增益变化就平均掉了，在信号存在于光纤中的时间内看到的是恒定增益。

拉曼放大器的另一个主要关心的问题是，由拉曼放大引起的 WDM 信号之间的串扰。一个在特定波长上的调制信号消耗了泵浦功率，并将同一调制信号有效地加到泵浦信号上。然后，在泵浦上的这一调制影响了下一波长得到的增益，在那一波长上明显地出现了串扰。泵浦与信号在相反方向传输再一次奇妙地降低了这一效应。由于这些原因，大多数拉曼放大器都采用了这种反向传输泵浦的结构。

另一个噪声源是由光纤中瑞利散射造成泵浦信号的背向反射所引起的。在拉曼放大器中，中自发发射噪声是相当低的。通常，这是占优势的噪声源，因为只要小心设计，大多数其他噪声源都能够被消除。

2.4.5 半导体光放大器

虽然半导体光放大器(SOA)用做放大器时不如 EDFA 好，但是实际上它是先于 EDFA 出现的。然而它们找到了别的应用，如用于开关和波长变换器件中。此外，理解 SOA 是理解半导体激光器的关键，而后者当今已广泛用于发射机中。

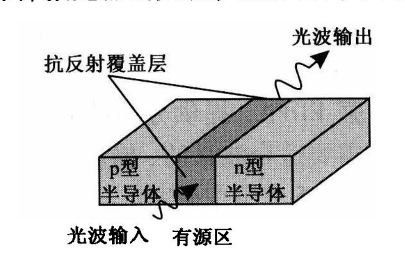


图 2.39 半导体光放大器结构方框图。当光波通过有源区传输时实现了放大。端面加上了抗反射覆盖层，以防止不希望有的反射，它能够引起放大器增益中的波纹

图 2.39 是半导体光放大器结构方框图。SOA 本质上是一个 pn 结。正如将简要说明的那样，在结区形成的耗尽层起着有源区的作用。当光波通过有源区传输时，由于受激发射而得到放大。放大器的有源区两端面都应加上抗反射(AR)覆盖层，以消除作为波长函数的放大器增益中的波纹。此外，端面也可以做成略带倾角，以降低反射。在半导体激光器中不需要 AR 覆盖层。

SOA 达到布居数反转的方式与 EDFA 不同。首先，布居数不是处于不同能级的离子数目，而是半导体材料中的载流子——电子或空穴的数目。空穴也可以被想象成类似于电子的荷电载流子，只是它们具有正电荷。半导体包括两个电子能级带：被称为价带的低迁移率的能级带和被称为导带的高迁移率的能级带。这两个能带被称为带隙的能量差分离，该能量差标记为 E_g。在带隙中不存在能级。考虑一个 p 型半导体材料。在热平衡时，材料的导带中电子浓度很小，如图 2.40(a)所示。参考以前关于 EDFA 的讨论，可以将导带看做较高能带 E_2，而价带看做较低能带 E_1，以方便讨论。术语“较高”和“较低”代表这些能带中的电子能量。(注意，如果正在考虑一种 n 型半导体，则将要考虑的是空穴能量而不是电子能量，这样，导带将是较低能量带 E_1，而价带就是较高能量带 E_2。)在布居数反转条件下，导带中的电子密度高得多，如图 2.40(b)所示。这一浓度的增加，使得存在光信号时有更多的电子由于受激发射过程从导带跃迁到价带，而由于吸收过程从价带跃迁到导带的电子却比较少。事实上，这一条件必须用来定义布居数反转或光增益。

在 SOA 中，给 pn 结施加前向偏置就能达到布居数反转。一个 pn 结包含两种半导体：p 型半导体，它用适当的杂质原子掺杂，从而得到过量的空穴浓度；n 型半导体，它具有过量的电子浓度。若两种半导体并列放置在一起，如图 2.41(a)所示，则空穴从 p 型半导体扩散

到n型半导体中，而电子则从n型半导体扩散到p型半导体中。这就在p型半导体中建立了一个带有负电荷的区域，在n型半导体中建立了一个带有正电荷的区域，如图2.41(b)所示。这些区域缺乏自由的电荷载流子，总称为耗尽区。当pn结上没有外加电压(偏置)时，少数载流子(在p型区是电子，n型区是空穴)浓度保持在它们热平衡时的数值。当结被前向偏置时，正偏置加在p型区，而负偏置加在n型区，如图2.41(c)所示，耗尽区的宽度减小，并且电子从n型区向p型区漂移。这一漂移过程增加了p型区导带中的电子浓度。类似地，存在空穴从p型区向n型区的漂移，这一漂移过程增加了n型区价带中的空穴浓度。当前向偏置电压足够高时，这些增加的少数载流子浓度产生了布居数反转，pn结就起了光放大器的作用。

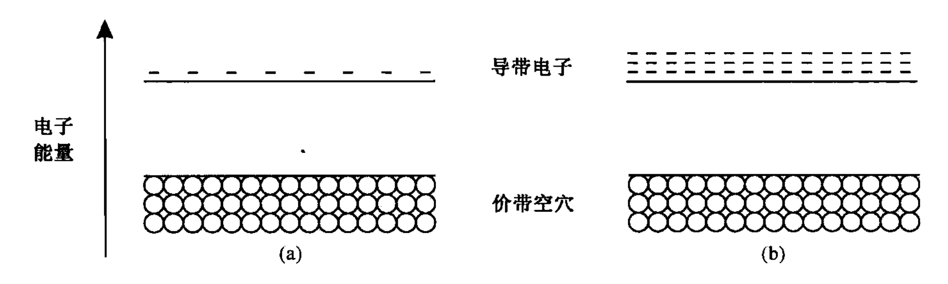


图2.40 p型半导体中的能带。(a) 热平衡时的电子浓度；(b) 布居数反转时的电子浓度

实际上，不是只使用一个简单的pn结，而是使用不同的半导体材料的一个薄层夹在p型和n型区之间的三明治结构。这样的器件称为异质结构。那么，这种半导体材料就形成了有源区或有源层。用于有源层的材料具有略微小些的带隙和比周围的p型和n型区高的折射率。较小的带隙有助于使注入到有源区的载流子(来自n型区的电子和来自p型区的空穴)受限制。较大折射率有助于使放大期间的光波受限制，因为现在的结构形成了一个介质波导。

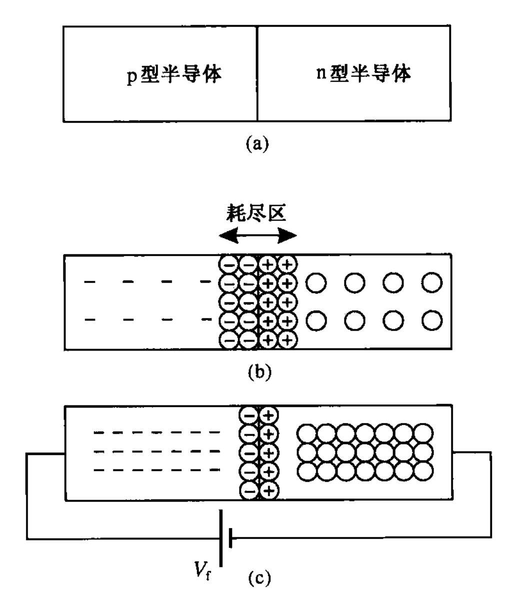


图2.41 用做放大器的一个前向偏置的pn结。(a) pn结；(b) 没有外加偏置电压时的少数载流子浓度和耗尽区；(c) 外加前向偏置电压V_f的少数载流子和耗尽区

在半导体光放大器中，布居数反转条件(受激发射超过受激吸收的条件)必须作为光频率或波长的函数考虑。考虑一个光频率f_c，使得$hf_c > E_g$，其中E_g是半导体材料的带隙。能够被放大的最低光频率(或最大光波长)与这一带隙相对应。当前向偏置电压增加时，这一波长的布居数反转条件首先达到。当前向偏置电压继续增加时，注入到 p 型区的电子将占据越来越高的能级，并且较小波长的信号能够被放大。实际上，SOA 的带宽可以达到 100 nm 量级。这就比 EDFA 达到的带宽大得多。使用 SOA 时在 1.3 μm 和 1.55 μm 频带中的信号甚至可以同时被放大。然而，由于几个原因，相对于 SOA 来说，人们宁愿使用 EDFA，其主要的原因是在 WDM 系统中使用 SOA 将引起严重的串扰。这一点将在下一节中讨论。用 EDFA 可达到的增益和输出功率也比较高。EDFA 的耦合损耗和偏振相关损耗也比较低，因为放大器也是一芯光纤。由于 SOA 的输入耦合损耗比较高，因此相对于 EDFA，它的噪声系数较高。(可以想象噪声系数是放大器引入噪声的量度。)最后，SOA 需要在端面处加上很高质量的抗反射覆盖层(反射率小于 10^{-4})，这也不是容易达到的。较高的反射率将在增益谱中产生波纹，并且由于温度起伏而引起增益变化。(想象这一器件是具有很低反射率的法布里-珀罗滤波器，并且增益谱类似于画在图 2.17 中的、对于很低反射率情况的曲线。)另一方面，可以使用 SOA 端面切角的方法获得所希望的反射率，付出的代价是增加了偏置相关性。

2.4.6 SOA 中的串扰

考虑一个 SOA，其输入是两个不同波长光信号的和。假定两者的波长都在 SOA 的放大带宽之内。一个信号的存在将由于受激发射过程消耗掉少数载流子浓度以至于被另一个信号看到的布居数反转降低了。因此，别的信号不能达到同样程度的放大，如果少数载流子浓度不是很大，甚至可能引起吸收！(回想到，如果布居数反转条件没有达到，则会有信号的净吸收。)因此，对于 WDM 网络，一个信道中的信号看到的增益将随着另外信道中信号的有无而变化。这一现象称为串扰(crosstalk)，它对系统性能有不利的影响。

这种串扰现象依赖于从高能态到低能态的自发发射寿命。如果与输入信号中功率起伏速率相比这一寿命足够大，则在对这些起伏的响应过程中电子来不及形成从高能态到低能态的跃迁，因此就没有任何串扰。在 SOA 的情况下，这一寿命在纳秒量级，因此电子很容易对 Gb/s 速率调制信号的功率起伏产生响应，由此引起的串扰会产生重大的系统损伤。与此对照，EDFA 的自发发射寿命大约 10 ms，因此，只有输入信号的调制速率低于几千赫兹时才会引起串扰，通常不是这种情况。因此，EDFA 比 SOA 能更适用于 WDM 系统。

有几种方法可以降低由 SOA 引起的串扰。一种方法是使放大器工作在小信号区域，在这一区域放大器增益受输入信号功率的影响相对较小。另一种方法是用各种技术使放大器增益嵌位，以至于甚至信号功率很高时它的增益保持基本恒定，不受输入信号影响。同样，如果存在特别大量的不同波长信号，虽然每个信号的功率变化，但是放大器输入信号的总功率相当平稳。

串扰效应不是没有用途。在 2.8.2 节中将看到，它可用于制作波长变换器。

2.5 光发射机

在这一节，将研究多种不同类型的光源。最重要的一类光源是激光器，其中又有许多不同的类型。激光器可以用于构建光发射机，也可以用来泵浦掺铒放大器和拉曼放大器。

当激光器用做 WDM 系统的光源时，需要考虑下述重要特性。

1. 激光器需要有相当高的输出功率。对于 WDM 系统，典型的激光器输出功率在 0~10 dBm 范围。相关的参量是阈值电流和斜率效率。这两个参量决定了电功率转换成光功率的效率。阈值电流是激光器开始发射光功率时的驱动电流，而斜率效率是输出光功率与驱动电流的比值。
2. 激光器应该在特定工作波长处具有一个窄的谱宽，以至于信号可以通过中间滤波器，并且多个信道可以紧密地放置在一起。边模抑制比是一个相关参数，将在后面讨论它。在可调谐激光器的情况中，工作波长能够改变。
3. 波长稳定性是一个重要的性能。在保持温度恒定的情况下，在整个激光器寿命期间的波长漂移相对于相邻信道之间的波长间隔应该是一小量。
4. 对于被调制的激光器，色散可能是影响链路长度的重要限制因素。

泵浦激光器需要提供比用做 WDM 光源的激光器高得多的功率量级。用于掺铒光纤放大器的泵浦激光器应输出 100~200 mW 的功率，而作为拉曼放大器的泵浦激光器的功率可能高达几瓦。

2.5.1 激光器

激光器本质上是包围在反射腔中的一个光放大器，使它经过正反馈产生振荡。半导体激光器采用半导体作为增益介质，而典型的光纤激光器使用掺铒光纤作为增益介质。半导体激光器是至今光通信系统中最普遍使用的光源。它们体积小，通常，其尺寸仅有几百微米。由于它们实际上是一个 pn 结，因此可以使用高度现代化的半导体集成技术大量制造。不像光纤激光器，它不需要光泵浦，这又是另一个优点。事实上，光纤激光器常常用半导体激光器作为泵浦源！半导体激光器也能够高效地转换电(泵浦)能量成为输出光能量。

半导体激光器和掺铒光纤激光器两者都能够得到高输出功率，典型数值在 0~20 dBm 之间，虽然半导体激光器用做 WDM 光源时其输出功率在 0~10 dBm。光纤激光器最常用来产生很短的周期光脉冲串(使用一种称为锁模的技术，在本节后面讨论)。

工作原理

考虑上述任一种光放大器，假定部分光能量在放大介质或增益介质，或腔的两个端面被反射，如图 2.42 所示。进一步假定腔的两个端面是平面，并且相互平行，因此增益介质放在一个法布里-珀罗谐振腔(见 2.3.5 节)中。这样的光放大器称为法布里-珀罗放大器。腔的两个端面(起着反射镜的作用)称为端平面。

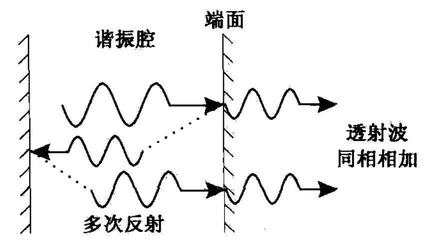


图 2.42 在法布里-珀罗谐振腔端面上的反射和透射

在法布里-珀罗腔中放置增益介质导致只有在腔的谐振波长处增益是高的。这一点的论据和法布里-珀罗滤波器一样(见2.3.5节)。如图2.42所示,在光波通过谐振腔一次以后,部分光波通过右端面离开谐振腔,部分被反射。反射波的一部分再次被左边端面反射到右端面。对于腔的谐振波长,所有透过右端面的光波同相叠加。作为同相叠加的结果,与别的波长相比,这些谐振波长的透射波的振幅大大增强了。因此,只要端面至少有部分反射,光放大器的增益就成为波长的函数。

如果放大器的增益和端平面反射率的联合作用足够大,放大器就开始"振荡",或者甚至没有输入信号时也产生光波输出。对于一个给定的器件,发生这一作用的点称为激光阈值(lasing threshold)。超过这一阈值,器件不再是放大器,而是振荡器,或者是激光器。之所以出现这一现象是因为在放大器的带宽内的所有波长处总是存在杂散的自发发射,它们甚至在没有输入信号时获得放大,并且出现光波输出。这一过程非常类似于电振荡器中发生的情况,电振荡器可以看做带有正反馈的(电子)放大器。(在电振荡器中,由于电子的随机运动引起的热噪声电流起着与自发发射同样的效果。)既然放大过程是由受激发射引起的,激光器的光输出是相干的(coherent)。术语"激光器"(laser)是辐射的受激发射产生的光放大的缩略语。

纵模

为了实现特定波长处的激光放大,必须满足两个条件。第一,波长必须在所用增益介质的带宽以内。如果激光器是用掺铒光纤制作的,那么波长必须在1525~1560 nm范围内。第二,腔长必须是腔中半波长的整数倍。对于一个给定的激光器,所有满足第二个条件的波长称为激光器的纵模(longitudinal mode)。形容词"纵"用以区别那些研究过的波导模式(严格地说,它们应该称为空间模式)。

前面叙述的激光器称为法布里-珀罗激光器(FP激光器),通常这种激光器有几个纵模同时振荡。这样的激光器称为多纵模(multiple-longitudinal mode, MLM)激光器。MLM激光器具有较大的频谱宽度,典型值大约为10 nm。一个MLM激光器典型的输出频谱如图2.43(a)所示。对于高速光通信系统,为了减小色散的影响,光源的谱宽必须尽可能窄。类似地,为了减小WDM系统中的串扰也需要窄谱宽(见2.3节)。因此希望设计的激光器仅有一个纵模(SLM,单纵模)振荡。SLM激光器输出的频谱如图2.43(b)所示。在激光器中采用滤波机构,以选择所需的波长,而使在别的波长处遭受损耗,从而实现单纵模振荡。这样的激光器的一个重要特性是它的边模抑制比,它决定了别的边模相对于主模的抑制水平。对于实际的SLM激光器,这一比值的典型值超过30 dB。现在考虑通常被用来实现SLM激光器的某些机制。

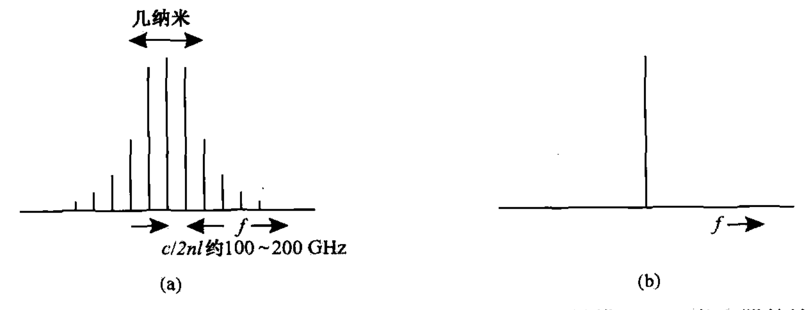


图2.43 (a)一个多纵模(MLM)激光器的输出频谱;(b)一个单纵模(SLM)激光器的输出频谱。激光腔长用l表示,它的折射率用n表示。一个MLM激光器的模式之间的频率间隔则是$c/2nl$

分布反馈激光器

前面所述的法布里-珀罗激光器是用腔端面处的反射平面来实现光的反馈的，因此可以说反馈被局限在端面处。也可以用一系列密集放置的反射器以分布的方式来实现光的反馈。实现这一点最通常的方法是使腔的宽度产生周期性变化，如图2.44(a)和(b)所示。

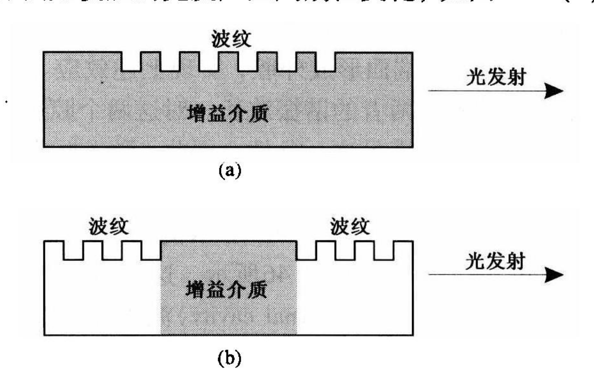


图2.44 (a) DFB激光器结构；(b) DBR激光器结构。在DFB激光器中，在同一区域获得增益和波长选择，而在DBR激光器中，波长选择区在增益区外面

在腔的波纹形段中，注入光波经受了一系列的反射。如果波纹周期是腔中半波长的整数倍，则每一个反射波对腔中形成的透射波形成同相叠加。这一条件的原理与法布里-珀罗腔用到的条件一样，这一条件被称为布拉格条件，并在2.3.3节对此进行了讨论。许多波长能满足布拉格条件，但是在波纹周期等于波长的一半时，而不是别的半波长整数倍时，发送的光波最强。因此，在牺牲别的波长的情况下，这一波长得到优先放大。对器件进行适当的设计，这一效应可以用来抑制其他纵模，以至于激光器实现单纵模振荡，其波长等于波纹周期的两倍。在制造过程中，改变波纹周期就能获得不同的工作波长。

任何使用波纹波导实现单纵模工作的激光器都可以称为分布反馈激光器。然而，缩略语DFB激光器(DFB laser)仅仅用于当波纹出现在腔的增益区内部时，如图2.44(a)所示。当波纹出现在增益区的外面时，如图2.44(b)所示，则激光器称为分布布拉格反射(distributed Bragg reflector，DBR)激光器。例如，改变波长选择区的折射率，激光器就能够被调谐到不同的波长，并且不影响激光器的其他工作参数。的确，这是2.5.3节研究的许多可调谐激光器的工作原理。

DFB激光器本来就比制作FP激光器更复杂，因此相对来说更贵一些。然而，在当今几乎所有高速传输系统中，都需要DFB激光器。FP激光器只在短距离数据通信中应用。

进入DFB激光器的反射引起了其波长和功率的波动，当封装激光器时，在它前面加一隔离器可以防止反射波的进入。激光器也常常与热电(TE)致冷器及放在激光器后端面的光电检测器封装在一起。TE致冷器是为了维持激光器工作在恒定温度，以防止它的波长漂移。工作于1.55 μm波长区域的半导体DFB激光器的温度灵敏度大约为0.1 nm/℃。上述光电检测器监测后端面漏出的光功率，它正比于激光器输出光功率。

DFB激光器的封装占据了器件整个价格的重要部分。对于WDM系统，将多个不同波长的DFB激光器封装在一个模块中是很有用的。那么，这一器件能够用做多波长光源，或者可以用做一个可调谐激光器(依赖于需要的波长，激光器阵列中的一个激光器被启动)。这些激光器都能够按阵列的形式生长在单个基片上。4个和8个波长的激光器阵列已经在一些研究

实验室中制作出来，但是还没有进展到大量生产。其主要原因是阵列作为整体的成品率相当低，如果激光器中有一个不满足指标要求，则整个阵列就必须被丢弃。

外腔激光器

也能够用另一种腔实现多于一个纵模振荡的抑制，这种腔称为外腔(external cavity)，它连着产生增益的主腔。图2.45表示了这种结构。与主腔具有谐振波长一样，外腔也具有谐振波长。作为例子，同样可以用反射端面形成外腔，实现上述效应。加入外腔的最终结果是激光器的振荡波长只能是主腔和外腔两者的谐振波长。对这两个腔进行适当的设计，就能保证只有在主腔增益带宽内的一个波长满足这一条件。因此，激光振荡被限制在单纵模。

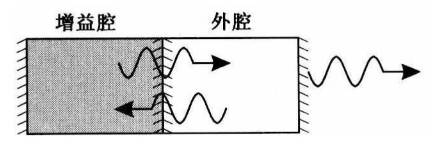


图2.45 外腔激光器结构

能够在外腔中用衍射光栅(见2.3.1节)代替图2.45所示的另一个法布里-珀罗谐振腔，如图2.46所示。这样的激光器称为光栅外腔(grating external cavity)激光器。在这种情况下，面向光栅的增益腔端面应该加上抗反射覆盖层。被衍射光栅反射回到增益腔的波长由光栅的节距(见2.3.1节)和它相对于增益腔的倾角决定。通常，外腔激光器用一个波长选择反射镜来代替波长平坦反射镜。(用于常规激光器中的高度抛光和/或用金属覆盖端面，起着波长平坦反射镜的作用。)波长选择反射镜的反射率是波长的函数。因此，只有某些波长具有高反射率，并且能够激射。如果适当选择波长选择反射镜，仅有其中一个波长出现在增益带宽内，则就能得到单模激光器。

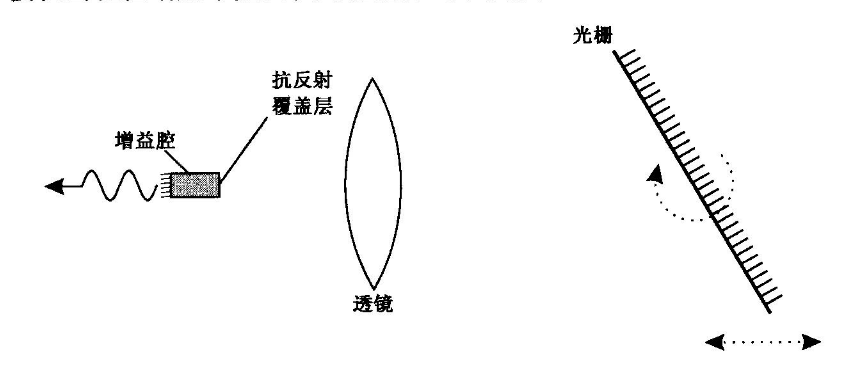


图2.46 一个光栅外腔激光器结构。旋转光栅就能调谐激光器波长

在2.3节讨论过的几种滤波器都能够被用做外腔激光器中的波长选择反射镜。我们已经看到了在外腔激光器中应用衍射光栅(2.3.1节)和法布里-珀罗滤波器(2.3.5节)。当前，这些激光器结构主要用于光测试仪器中，不属于为传输系统用的低价格、大批量生产的SLM光源，尽管有一种形式的外腔激光器表现出特别有希望用于这一目的。这种器件用一个光纤布拉格光栅放在通常的FP激光器前面，其前端面使用抗反射覆盖。那么，这种器件起着一个单纵模DFB激光器的作用。与DFB激光器相比，它的制造成本相当低，并且由于光纤光栅的低温度系数，因此在本质上它的波长具有较高的温度稳定性。

外腔激光器的一个缺点是，它们不能高速地直接调制，因为它们的腔长很长。

垂直腔面发射激光器

本部分将研究另一类激光器，它们以略微不同的方式实现单纵模工作。多纵模激光器的

模间频率间隔是 $c/2nl$，其中 l 是腔长，n 是折射率。如果将腔长做得足够小，以至于只有一个纵模出现在激光器增益带宽之内，则其结果是如果有源层沉积在半导体基质上，如图 2.47 所示，则做一个很薄的有源层是容易得多的事。因此，这就形成一个垂直腔，在半导体晶片的顶表面和底表面形成了垂直腔的两个反射镜。激光输出也是从这两个表面中的一个(通常是顶表面)取出。由于这些原因，这样的激光器被称为垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface-emitting laser, VCSEL)。迄今，已经讨论过的其他激光器因此被称为边发射激光器(edge-emitting laser)。

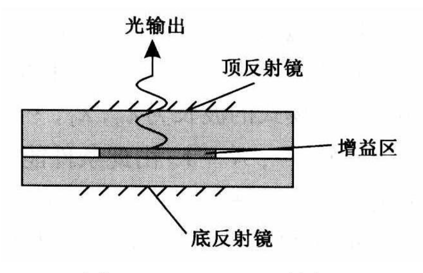


图 2.47　VCSEL 的结构

由于增益区长度很短，因此为了实现激光振荡，需要反射镜具有很高的反射率。用金属表面很难得到如此高的镜反射率。因此，将高折射率介质和低折射率介质交替堆积，就能够用做高反射的反射镜，虽然它是波长选择的反射镜。这样的反射镜的反射率将在习题 2.13 中讨论。这样的介质反射镜可以在激光器制造过程中利用沉积方法生成。

VCSEL 的一个问题是注入电流遭遇到大的欧姆电阻。这将导致器件严重的发热，并且需要有效的冷却。由于用来制作反射镜的许多介质材料具有低的热传导性，所以用这样的介质反射镜很难实现 VCSEL 的室温工作，因为器件产生的热不能容易地消散掉。由于这一原因，在 1979 年 VCSEL 被首次验证后的数年内，它们不能够在室温下工作。然而，进行了大量的新材料和新技术研究后，室温下工作的 1.3 μm 的 VCSEL 已经被演示[Har00]。

与边发射激光器比较，VCSEL 的优点主要是能较简单且有效地与光纤耦合、较容易封装和测试，以及它们能够集成为多波长阵列。工作于 0.85 μm 的 VCSEL 已可以买到商用产品，它可与低成本、短距离的多模光纤互联。此外，1.3 μm 的商用 VCSEL 也可以买到。

在 WDM 系统中，每条链路可同时传送多个波长信号。通常，对于每一个波长，需要一个单独的激光器。如果所有激光器能够集成在单个基片上，则发射机的价格将大大下降。这是发展阵列激光器的主要动力，如较早讨论过的 DFB 激光器阵列。此外，只要启动阵列中所需的一个激光器，阵列激光器就可以简单地用做可调谐激光器。利用面发射激光器，可制造出二维激光器阵列，如图 2.48 所示。由于这一附加的维度，用面发射激光器也可以达到比边发射激光器高得多的封装密度。然而，阵列中激光器输出的光很难耦合进入光纤，因为还没有方便地与这种二维几何结构配合工作的复用器。这些阵列激光器与别的阵列激光器结构一样，如果其中一个激光器不满足指标要求，则整个阵列必将被丢弃。

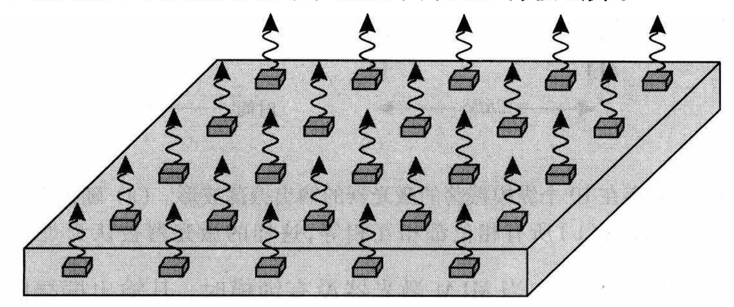


图 2.48　二维阵列的垂直腔面发射激光器

锁模激光器

锁模激光器用来产生窄的光脉冲。在第9章中，将要研究的高速TDM系统就需要这种窄的光脉冲。考虑一个法布里-珀罗激光器，它具有N个彼此相邻的纵模振荡。这就意味着，如果这些模式的波长为$\lambda_0, \lambda_1, \cdots, \lambda_{N-1}$，则对于某些整数$k$，腔长$l$满足$l = (k+i)\lambda_i/2$，$i = 0, 1, \cdots, N-1$。由此条件能够指出(见习题2.7)这些模式的相应频率$f_0, f_1, \cdots, f_{N-1}$必须满足$f_i = f_0 + i\Delta f$，$i = 0, 1, \cdots, N-1$。在频率$f_i$处的振荡具有形式$a_i\cos(2\pi f_i t + \phi_i)$，其中$a_i$是模式$i$的振幅，$\phi_i$是其相位。(严格地说，这是纵模相关联的电场时间分布。)因此，总的激光器输出振荡信号应具有形式

$$\sum_{i=0}^{N-1} a_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i)$$

在$N = 10$的情况下，对于不同的ϕ_i值，在图2.49中给出了这一表达式的图形。在图2.49(a)中，ϕ_i随机选取；在图2.49(b)中，选择它们为互相相等。在两种情况下，都选择a_i相等，并且为了图解的目的，频率f_0比它的典型值减小了。

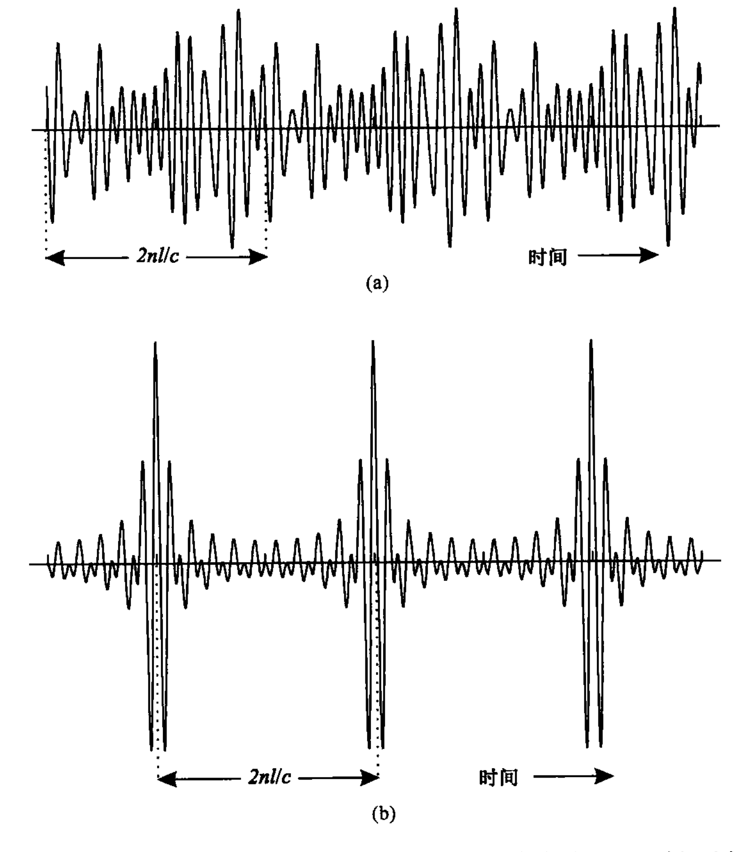


图2.49 同时存在10个纵模振荡的激光器的输出振荡波形。(a)随机选择模式的相位；(b)所有相位都相互相等，这样的激光器被认为是锁模的

从图2.49(a)中可以观察到，当MLM激光器没有锁模时，其输出振幅随时间快速变化。从图2.49(a)中还可以看到，相邻纵模之间的频率间隔为$c/2nl$。如果$n = 3$，$l = 200$ μm，对

于半导体激光器，这些都是典型值，则可以得到这个频率间隔为250 GHz。因此，这些振幅波动是极快速的(在时间量度上是几个皮秒的量级)，并且对于开关键控调制，即使比特率达到几十吉比特每秒，这种起伏也不会引起问题。

从图2.49(b)中可以看到，当选择ϕ_i相互相等时，这种激光器的输出振荡具有周期窄脉冲串的形式。工作于这种方式的激光器称为锁模激光器(mode-locked laser)，这是产生窄光脉冲的最普通的方法。

如图2.49(b)所示，锁模激光器的脉冲间时间间隔为$2nl/c$。正如较早所看到的，对于典型的半导体激光器，这一间隔相当于几皮秒。对于1~10 GHz范围的调制，脉冲间的间隔应该是0.1~1 ns的范围。为了实现这一范围的脉冲间隔，锁模激光器需要腔长l在1~10 cm范围(假定$n = 1.5$)。使用光纤激光器可以容易地获得这么长的腔长，光纤激光器需要这样的长度以获得足够的增益来导致激射。

得到锁模的最普通的方法是调制激光腔的增益。既可以用振幅调制，也可以用频率调制。用振幅调制的锁模如图2.50所示。腔的增益调制的周期等于脉冲间隔，即$2nl/c$。选择这种调制的幅度，使得平均增益不足以使任一单个模式产生振荡。然而，如果大量的模式都是同相的，则在腔的内部就有足够的能量积累，使得激光振荡在高增益瞬间实现，如图2.50所示。

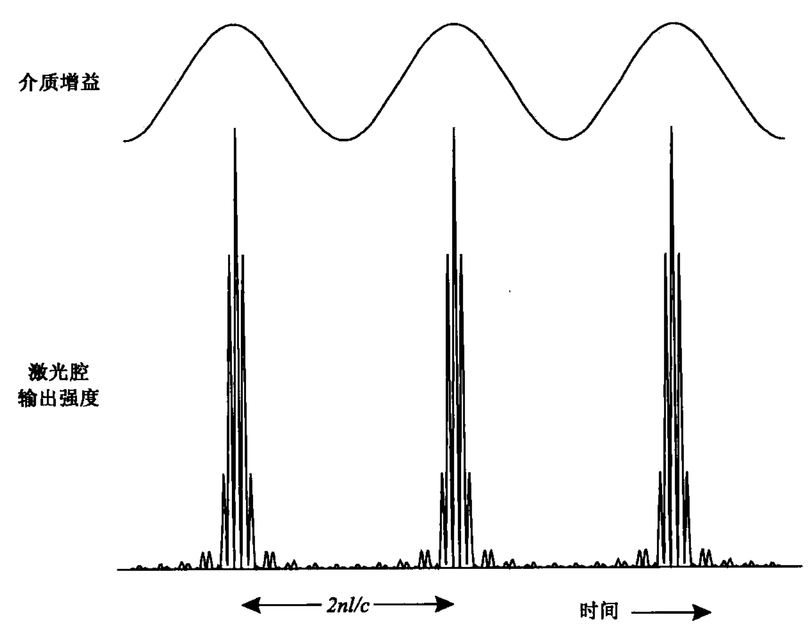


图2.50 用激光腔增益振幅调制实现锁模的图形表示

在腔内引入外调制器，能够实现光纤激光器的增益调制。

2.5.2 发光二极管

激光器是很贵的器件，对于数据率低、传输距离短的许多应用，不值得使用这样昂贵的器件。许多数据通信应用(见第3章)和某些接入网(见第8章)中的情况就是这样。在这种情况下，采用发光二极管(light-emitting diodes，LED)是另一种低成本的方案。

LED是一个前向偏置的pn结，其中由自发发射过程引起的注入少数载流子(在p型区是电子，在n型区是空穴)的复合产生了光。(也可能出现不希望的无辐射复合，这是影响LED性能的一个重要因素。)由于可以在增益介质的整个频带内出现自发发射(相应于LED的价带和导带之间的所有能量差)，因此不像激光器，一个LED的光输出具有很宽的频谱。可以将一个LED粗略地想象成端面反射不强的激光器。增加泵浦电流只能增加自发发射，而且由于端面反射很差，不能建立受激辐射过程。由于这一原因，LED也不能产生如激光器那样的高输出功率，其典型的输出功率在-20 dBm量级。它们不能用于数据率大于几百兆比特每秒的直接调制(见2.5.4节)。

在一些低速、低费用预算的应用中，需要具有窄频谱宽度的光源。DFB激光器可以提供窄频谱宽度，但是对于这些应用可能太贵了。在这种情况下，LED频谱切割提供了一种不同的便宜方案。LED频谱片段是放在LED前面的窄通带光滤波器的输出。光滤波器选择LED输出的一部分。不同的滤波器可以选择LED输出的(几乎)不相重叠的频谱片段。因此，一个LED能够被许多用户分享。该技术的应用将在第8章中看到。

2.5.3 可调谐激光器

由于几个原因，可调谐激光器是WDM网络中非常需要的元件。固定波长的DFB激光器很适合当前的应用。然而，对于每一个波长，都需要一个不同的激光器。这就意味着，对于100信道的WDM系统，就需要储备100个不同波长的激光器。联系着这一问题的货物库存和备用就需要很大花费，且影响着从激光器制造商到网络工作人员的每一个人。激光器制造商需要为每个激光器波长设立多个生产线和测试线(或者分时使用同一生产线和测试线，而且在制造不同激光器时每次都要改变设置)。设备提供商需要储备这些不同波长的激光器，并且对每一个波长都要保留目录和分享情况。最后，网络工作人员需要为现场发射机失效事件存储备份波长，并且需要更换失效的激光器。使用可调谐激光器则可大大降低这一问题的复杂性。

可调谐激光器也是可重构光网络中关键的使能器件之一。它们提供了选择光路径光源发射波长的灵活性。例如，如果希望具有起始于一个节点的全部4条光路，则可以用4个可调谐激光器装备那个节点。这样，我们将能够任意选择这4个发射波长。与此对照，如果打算使用固定波长激光器，就必须用大量的激光器预先装备这个节点以覆盖所有可能的波长，或者只能按照需要人工装备适合的波长。在第4章中，将看到这种应用的更多例子。这些应用所需的调谐时间都在毫秒量级，因为波长选择仅多次发生在光路建立的地方，或者是在失效事件中需要重路由的时候。

可调谐激光器的另一种应用是在光分组交换网络中，其中，数据需要用不同的波长在逐个包的基础上发送。当前这些网络还处在它们的早期研究阶段，而且支持这样一种应用需要调谐时间在纳秒到微秒量级，这依赖于所用的传输比特率和分组包长度。

最后，可调谐激光器是大多数WDM实验室和测试环境中的常用器件，在那些地方，它们被广泛用来表征和试验各种光学设备的特性。在典型情况下，这些激光器是台式器件，不适合用于电信设备。电信设备中，需要小型化、低成本的半导体激光器。

使用量子阱(quantum well)结构使得用于大多数长波长激光器的InGaAsP/InP材料的性能增强，在1.55 μm波段，这种材料具有大约250 nm的总增益带宽，对于满足当前WDM系

统的需要而言，已经足够大。然而，可用的调谐机制的调谐范围都限制在这一数值的小部分。下面是一些常用的典型调谐方法。

- 将电流注入半导体激光器引起了材料折射率的变化，继而改变了激射波长。这一效应是相当小的，折射率(和波长)可能只有0.5% ~2%的改变。在1.55 μm的波长窗口，使用这一效应能够实现大约10 ~15 nm的调谐范围。
- 温度调谐是另一种可能的调谐方法。半导体激光器相对于温度的波长灵敏度近似为0.1 nm/℃。实际上，相应于10℃的温度变化，允许的温度调谐范围大约为1 nm。在比室温高得多的温度下运行的激光器会使其加快老化，从而使使用寿命缩短。
- 在使用分离外腔结构的激光器中采用机械调谐的方法，能够得到很宽的调谐范围。许多这样的激光器体积比较大。我们将注意这类激光器中的一种结构，其中采用微机电调谐机制，器件可以做得很小。

正如所看到的，调谐机制是复杂的，并且在许多情况下，调谐机制与调制机制相互作用，使得此处所研究的大多数可调谐激光器都很难采用直接调制。

理想的可调谐激光器应该能够在超过100 nm的宽连续调谐范围内快速调谐。它在寿命期间应该是稳定的，并容易控制和便于制造。这里描述的许多可调谐激光器技术已经存在了很多年，但是由于制造和控制这些器件及解决可靠性问题的复杂性，使得现在才开始看到这些器件的商用产品。对这些器件强劲的市场需求，已经促使人们进一步努力来解决这些问题。

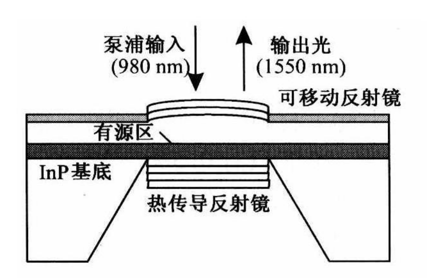
外腔激光器

如果使用的光栅或其他波长选择反射镜的中心波长能够被改变，则外腔激光器可以被调谐。考虑如图2.46所示的光栅外腔激光器。由光栅对增益腔的反射所选择的波长，由衍射光栅的节距及其相对于增益腔的倾斜角和到增益腔的距离决定[见2.3.1节，特别地，见式(2.9)]。因此，改变衍射光栅的倾角及其到增益腔的距离(在图2.46中用虚线箭头表示)，激光器激射波长就能够被改变。这是一个缓慢的调谐方法，因为衍射光栅的倾角和位置都必须用机械方法改变。然而，对于半导体激光器，用这一方法可以得到大约100 nm的很宽的调谐范围。这一方法适合在试验仪器中应用，不适合用做通信系统中所需的小型光源。

可调谐 VCSEL

在2.5.1节中研究了VCSEL。此处，我们看到实现长波长1.55 μm VCSEL的主要问题是获得足够的腔增益、获得高反射的反射镜表面、处理热耗散，以及使得激光器工作于单纵模。图2.51表示了一个VCSEL的设计方案[Vak99]，该方案试图解决这些问题，而且使得激光器本身可调谐。用一个可移动的微机电(MEM)薄膜制作上反射镜可以实现激光器的可调谐。在上下反射镜之间加电压，用以移动上反射镜，就能够调节腔的间距。将上反射镜弯曲，以防止腔中的光束走离，从而得到更好的激射模式的确定性。

为了从底反射镜散热，在InP基底上蚀刻一个孔。该设计利用了一个980 nm泵浦激光器去泵浦VCSEL腔。任一低于需要的激射波长的泵浦波长都能够被用来激励半导体中电子到达导带。例如，用来泵浦掺铒光纤放大器的980 nm半导体泵浦源也一样能够在这里应用。设计泵浦光点的尺寸与激射基模的尺寸匹配能够使得单纵模工作，而且抑制高阶法布里-珀罗腔模式。利用增益特性实现这一功能比试着设计腔以提供高阶模的较高损耗更好。高增益也使得输出耦合反射率降低，同时在腔内保持足够的反转，以防止额外的复合。



2.51 一个可调谐微电机械垂直腔表面发射激光器(MEM-VCSEL)结构(引自文献[Vak99])

在文献[Vak99]中描述的激光器能够在 50 nm 的调谐范围内输出大约 0 dBm 的连续波(CW)功率。

两段和三段 DBR 激光器

如在前面所看到的，注入电流进入半导体激光器能够改变其折射率，这样可以得到大约 10 nm 的总调谐范围。图 2.44 所示的 DFB 激光器能够用改变前向偏置电流进行调谐，该电流改变了折射率，继而改变了激光腔中光栅的有效节距。然而，改变前向偏置电流也改变了器件的输出功率，使得这一技术不适合于 DFB 激光器。

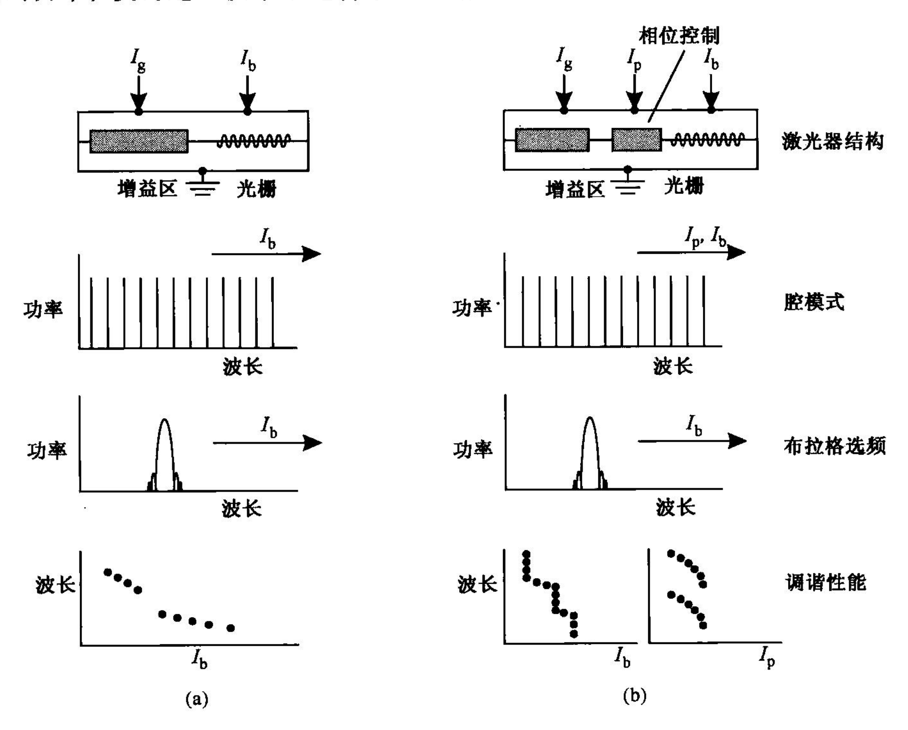


图 2.52 两段和三段 DBR 激光器及其波长选择原理。(a) 两段 DBR 结构，其中表明了分开控制的增益区和布拉格区；(b)三段DBR结构，它增加了腔相位的附加控制

一个普通的 DBR 激光器也具有单个的增益区，它可以用注入前向偏置电流 I_g 来控制，如图 2.44(b)所示。改变这一电流仅能改变输出功率，而不改变波长。在这种结构中增加另一个电极，以便单独注入电流 I_b 进入布拉格区，并使该区与增益区去耦，如图 2.52(a)所示。这就使得波长单独被控制，而与输出功率无关。

正如在普通的DBR激光器中那样，激光器具有多个与腔长相应的密集排列的谐振腔模式。其中一个激射的模式相应于布拉格光栅的波长峰。当改变I_b以改变光栅的波长峰时，激光器从一个谐振腔模式跳到另一个模式。这一效应如图2.52(a)所示。当电流I_b改变时，布拉格波长随着改变。同时，由于整个腔的光栅部分的折射率变化，使得腔模间隔微小变化。然而，这两个变化不是互相跟随着发生。作为结果，当I_b变化和布拉格波长改变时，激光器波长改变，但在某一时间内激光器保持在同一个腔模下运行。当电流进一步变化时，激光器将跳到下一个谐振腔模。仔细控制腔长，能够使腔模之间的波长间隔等于WDM信道间隔。

为了在整个波长范围内连续调谐，可以在DBR中再增加一个附加的相位段，如图2.52(b)所示。在这一段注入第三个电流I_p，就能控制腔模间隔，并且与激光器中存在的其他效应无关。在2.3.5节中已经指出，为了获得跨整个自由谱区的调谐，只要有效腔长改变半个波长(或者等效于相位改变π)就足够了。这一改变只占整个腔长很小的分数，并且很容易用注入电流到相位段来实现。仔细控制I_p，使得一个腔模对准由I_b决定的布拉格光栅的波长峰，波长就能够在可调谐范围内连续调谐。

几年前，已经验证了两段和三段DBR激光器调谐范围能够覆盖32个信道，每相邻信道增加50 GHz[KK90，Kam96]，并且正面临商用。

很明显，需要解决的主要问题是对这些激光器的控制，这可能是很复杂的。当激光器老化或温度变化时，控制电流需要重新调整，否则激光器可能最终跳到另一波长。跳变可能快速来回发生，并且跳变本身可能表现为激光器输出处的相对强度噪声(RIN)。在某种意义上，没有考虑这样的事实，DFB激光器用一个固定光栅制造，以至于波长很稳定。这些问题仅仅在进一步使用更复杂的激光器结构时才会出现，下面将对此进行讨论。

至今，已经研究的DBR激光器都限制在10~15 nm调谐范围，相当于折射率变化0.5%~2%。若要增加调谐范围超过这一数值，就需要一些窍门。一个窍门是使激光器波长依赖于两个不同区域的折射率之间的差。总的改变可能比每个单一区域引起的改变高得多。所谓垂直光栅辅助耦合滤波(VGF)激光器[AKB+92，AI93]就利用了这一原理。第二个窍门是使用游标尺效应，其中有两列波长梳，每一个都带有略微不同的波长间隔。两列波长梳的联合提供，产生了另一个峰间隔大得多的周期性波长梳。习题2.28更详细地解释了这一结果。甚至在每一个波长梳只能在一个小范围调谐的情况下，两个梳的联合就能得到大得多的调谐范围。取样光栅(sampled grating，SG)DBR和超结构光栅(super-structure grating，SSG)DBR[JCC93，Toh93]使用了这一方法。最后，光栅耦合取样反射(grating-coupled sampled reflector，GCSR)激光器[WMB92，Rig95]联合使用了上述两种方法。

VGF激光器

图2.53给出了VGF激光器的图示结构。它包括两段波导和它们之间的耦合区。它的工作原理类似于2.3.9节介绍的声光可调谐滤波器。利用式(2.17)，波长λ的信号从折射率为n_1的一段波导耦合到折射率为n_2的另一段波导的条件是

$$\lambda = \Lambda_B(n_1 - n_2)$$

式中，Λ_B是布拉格光栅的周期。如果将一个区的折射率n_1改变Δn_1，因而引起波长变化$\Delta\lambda$，其中

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta n_1}{n_1 - n_2}$$

该值比 $\frac{\Delta n_1}{n_1}$ 的比值大得多，后者是先前研究的两段和三段 DBR 能够达到的比值。

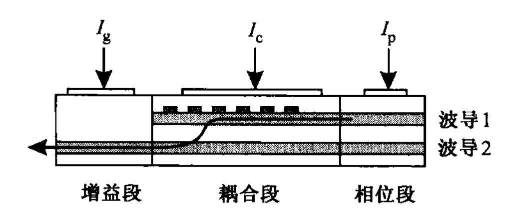


图 2.53 垂直光栅辅助耦合滤波可调谐激光器

在图2.53 中，电流 I_c 控制折射率 n_1，I_g 是给另一段波导中的增益区提供的电流。正如两段和三段 DBR 的情况那样，为了获得连续调谐，需要用第三个电流 I_p 控制腔模间隔。已经证明，使用这一方法可以使激光器具有超过 70 nm 的调谐范围。

这一方法的一个主要问题是需要相当长的腔长(典型值为 800 ~ 1000 μm)，以便获得两段波导之间的良好耦合。这就使得腔模密集地排列在一起。因而，这种激光器从一个腔模跳到另一个腔模相当容易，甚至在所有控制电流都保持恒定时也是如此。这一效应的明显结果是边模抑制比很差，使得这种激光器不适合于高比特率长距离传输。

取样光栅和超结构光栅 DBR 激光器

图 2.54 表示了一个取样光栅 DBR 激光器。它具有两个光栅，一个在前端，一个在后端。在前端的布拉格光栅定期中断[或称为取样(sampled)]一段时间，其周期为 Λ_1。这就产生一系列周期性的布拉格反射峰，其波长间隔为 $\lambda^2/2n_{\text{eff}}\Lambda_1$，如图 2.54 所示，其中 λ 为标称中心波长。反射率峰值逐渐变小，其最大反射出现在布拉格波长 $2n_{\text{eff}}\Lambda_1$，其中 Λ_1 是光栅周期[①]。在后端的光栅，以不同的周期 Λ_2 取样，它生成了另一系列的反射峰，其间隔为 $\lambda^2/2n_{\text{eff}}\Lambda_2$。为了实现激射，需要两个布拉格光栅的反射峰和一个腔模重叠。虽然每一个反射峰的调谐范围被限制在 10 ~ 15 nm，两组反射峰的联合就能增大调谐范围。正如用两段和三段 DBR 激光器那样，一个分开的相位段控制腔模间隔，保证了连续调谐。这一方法的另一个复杂性问题是因为反射峰逐渐减弱，当激光器调谐离开布拉格主反射峰时，就需要增加增益区的电流，以补偿较差的反射率。

获得相同效果的另一种方法是采用周期性啁啾(chirped)光栅代替图 2.54 中的光栅。这样的结构称为超结构光栅 DBR。这种结构的优点是啁啾光栅可以在一个比取样光栅更宽的波长范围内提供一组高反射的峰。

光栅耦合取样反射(GCSR)激光器

光栅耦合取样反射激光器是一个 VGF 和一个取样光栅或超结构光栅的联合，如图 2.55 所示。VGF 提供一个宽的调谐范围，而 SSG 光栅提供高的选择性，以消除边模。在某种意义上，VGF 提供了粗的调谐，以选择波长带，带中包含多个腔模，而 SSG 光栅选择带中的波长。正如在两段和三段 DBR 激光器那样，一个附加的相位段提供腔模的精细控制，以实现带内的连续调谐，用以抑制边模。

---

① 原文中误为 Λ ——译者注。

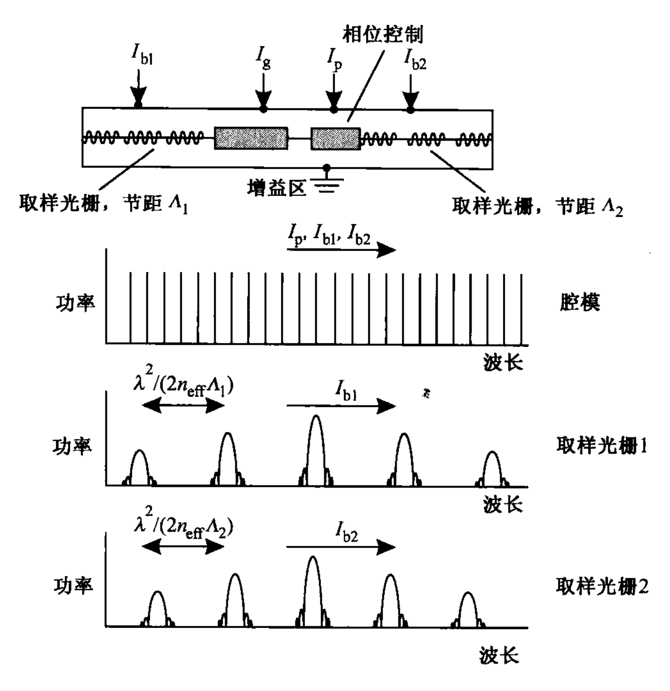


图 2.54 取样光栅 DBR 激光器及其波长选择原理

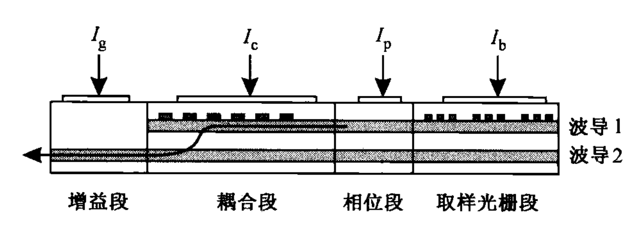


图 2.55 光栅耦合取样反射激光器

激光器阵列

获得可调谐激光器源的另一种方法是采用由不同波长激光器组成的阵列，并且在任一时间调出它们当中的一个。阵列也可以用来代替单个光源。

一种方法是制作一个 DFB 激光器阵列，每一个激光器具有不同的波长。结合温度调谐技术，能够用这种方法获得相当好的连续调谐。采用这一方法的主要问题是阵列中单个激光器波长的精度问题，使得很难从阵列中获得间隔精确的波长梳。然而，如果在任一给定的时刻只用一个激光器，就能够利用温度调谐对这一不精确的波长进行补偿。用该方法的激光器已经被验证，并且用于系统试验[Zah92，You95]。

另一种方法是采用法布里-珀罗型激光器阵列，并且采用外部机构选择激射波长。已经提出了几种相关结构[Soo92，ZJ94]，一种是使用外部波导光栅，另一种是使用外部阵列波导光栅。采用这些结构波长精度由外部光栅决定。长的腔长可能在光栅波长选择窗中产生大量腔模，这就可能引起激光器在运行期间在腔模之间跳变。

2.5.4 直接调制和外调制

在光束流上加载数据的过程称为调制。最简单也是最广泛应用的调制方案称为开关键控(on-off keying, OOK)。该方案依据数据比特是1或是0来接通或关断光束流。

通常，采用下述两种方法中的一种来实现OOK调制信号:(1)采用半导体激光器或LED的直接调制(direct modulation);(2)采用外调制器(external modulator)。图2.56示出了直接调制方案的原理。对于1比特，设定驱动电流明显高于阈值，而对于0比特，驱动电流则应低于(或略高于)阈值。1比特和0比特时输出功率的比值称为消光比(extinction ratio)。直接调制简单且不贵，因为除了光源(激光器/LED)本身外这种调制方案不需要其他元件。事实上，半导体激光器的一个主要优点就是它们能够被直接调制。相反地，许多其他的激光器是连续波光源，它们完全不能被直接调制。这些激光器需要一个外调制器。例如，由于在图2.35中处于E_2能级的铒原子的长寿命，甚至在速率低到几千比特每秒时，铒激光器也不能被直接调制。

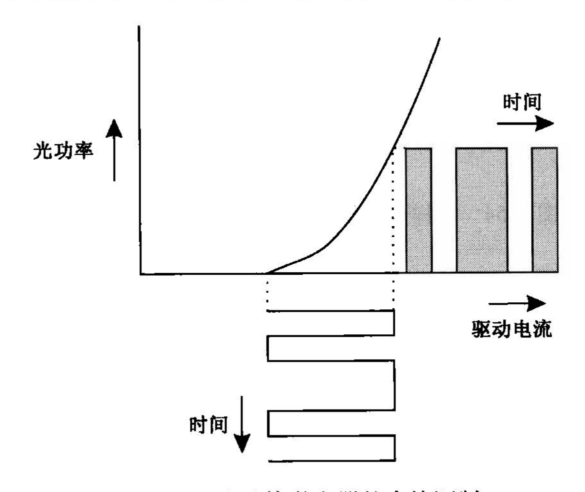


图2.56 半导体激光器的直接调制

直接调制的缺点是所产生的脉冲带有相当大的啁啾。啁啾是这样一种现象，即传送脉冲的载波频率会随时间改变，由此引起了发射频谱的增宽。啁啾脉冲比无啁啾脉冲的色散性能差得多。增加发射“0”比特时的功率，以使激光器总是保持明显高于阈值的状态，就能够降低啁啾量。这一方法的缺点是会降低消光比，进而反过来恶化系统的性能。实际上，能够实现大约7 dB的消光比，同时保持合理的啁啾性能。由啁啾脉冲增加的脉冲增宽足够大，以至于在高速色散有限的通信系统中应该采用外调制器。

OOK外调制器都放在光源的前面，并且根据发射的数据来接通或关断光信号。光源本身是连续运行的。它的优点是最大限度地减少了不希望产生的效应，特别是啁啾的影响。几种类型的外调制器已有商品销售，并且逐渐做到了与激光器一起集成在一个单一的封装中，以降低器件价格。实际中，发射机封装模块包括激光器、外调制器和波长稳定电路。该模块的商用产品已用于WDM系统中。

对于采用孤子或归零码(RZ)调制的通信系统，外调制器已经成为其发射机的主要元件。正如图2.57(a)所示，用一个产生周期脉冲串的激光器，如锁模激光器(见2.5.1节)，后接一个外调制器就能够获得调制的RZ脉冲串。调制器将相应于0比特的脉冲阻断。(通常，不

能直接调制发射周期脉冲的脉冲激光器。)很遗憾，能够产生周期脉冲的、便宜的和小型的固体激光器还没有商品。更一般的情况，如图2.57(b)所示，当前实际的RZ系统采用一个连续波DFB激光器，接着一个两级外调制器。第一级产生周期性短(RZ)脉冲串，而第二级用阻断0比特脉冲，用以实现调制。色散管理孤子系统需要产生仔细控制啁啾量和符号的RZ脉冲。采用另一个相位调制级就能实现这一点。

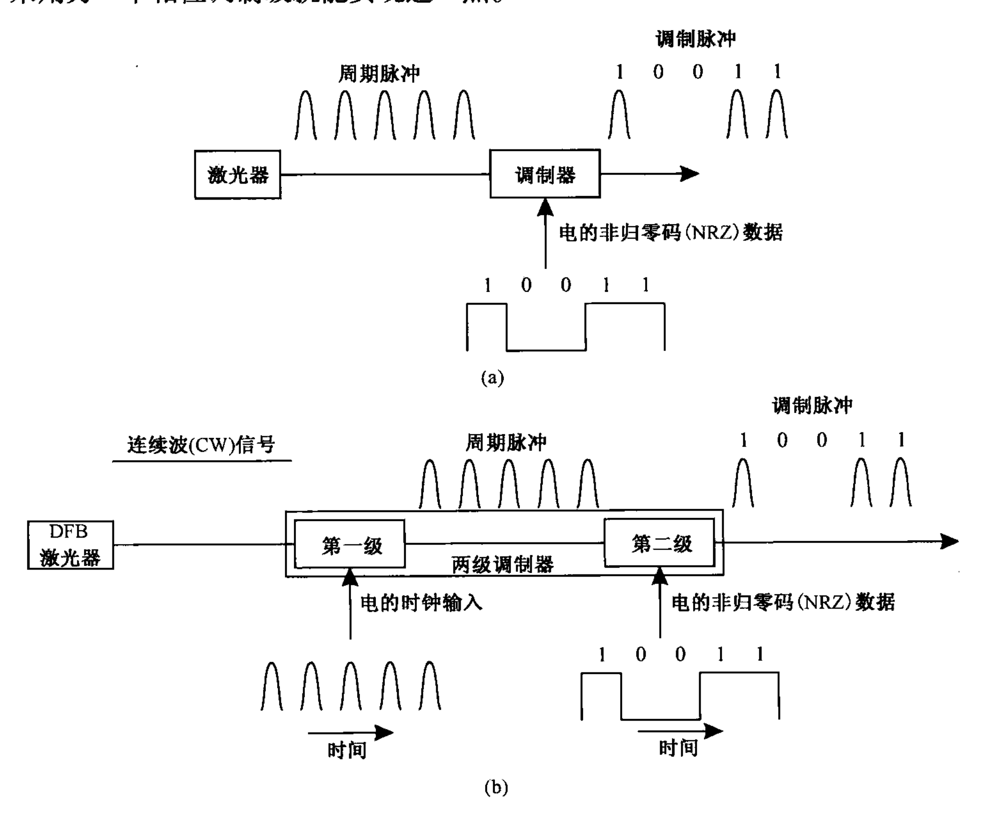


图2.57 在使用RZ脉冲或孤子脉冲的系统中采用外调制器实现其发射机。(a)一个发射周期脉冲串的激光器后采用外调制器阻断"0"比特，并让"1"比特通过；(b)一个更一般的方法是采用一个连续波(CW)DFB激光器接着一个两级调制器

当前，广泛应用两种类型的外调制器：铌酸锂调制器和半导体电吸收(EA)调制器。铌酸锂调制器应用光电效应，其中一个外加电压引起材料折射率的变化。器件的结构或者像一个定向耦合器，或者像一个马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。图2.58显示了定向耦合器结构。在耦合区外加一个电压就能改变其折射率，反过来，这一变化就确定了多少功率能从图中的输入波导1耦合到输出波导1。

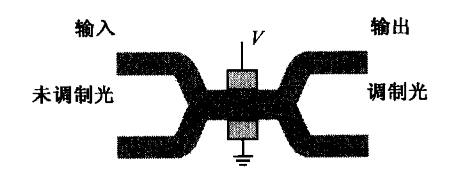


图2.58 采用定向耦合器结构的铌酸锂外调制器

图2.59表示了MZI结构，其工作原理已经在2.3.7节中介绍。与定向耦合器比较，对于给定的驱动电压，MZI给出了较高的调制速率，并且达到了较高的消光比。由于这些原因，这是一种更普遍使用的结构。在一个状态下，MZI两臂中的信号处于同相，并且在输出处相干相加并有信号输出。在另一状态下，外加的电压在MZI两臂之间产生π相移，导致输出处信号相干相消，结果没有信号输出。这些调制器具有很好的消光比，其值从15 dB到20 dB，并且能够精确控制啁啾。由于器件的高偏振相关特性，在激光器和调制器之间使用了保偏光纤。

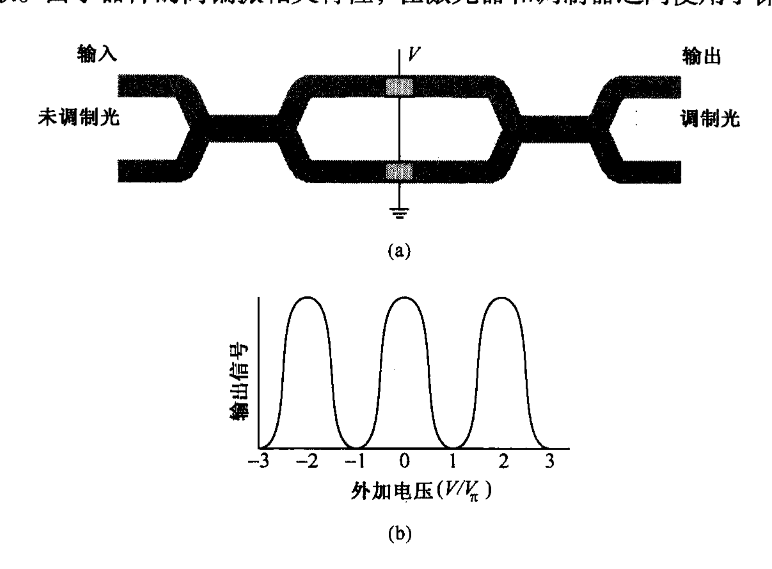


图2.59 一个采用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的铌酸锂外调制器。(a)器件结构；(b)理论开关响应作为外加电压V的函数，V_π表示两臂之间的相移达到π时所需的电压。注意，MZI具有周期性响应

EA调制器是除铌酸锂调制器以外的又一种有吸引力的器件，因为它可以用制造半导体激光器同样的材料和技术制造。这就允许将EA调制器和DFB激光器集成在一起，并封装在同一个盒子中。因而，与铌酸锂外调制器相比，用EA调制器可以得到一个小型的且较低价格的模块。简单地说，EA调制器采用一种材料，使得在正常情况下其带隙大于注入光信号的光子能量。这就使得光信号通过它传输。在调制器上外加一个电场引起材料的带隙收缩，使得注入光子被材料吸收。这一效应称为弗朗兹-凯尔迪什效应(Franz-Keldysh effect)或斯塔克效应(Stark effect)。这一效应的响应时间足够快，使得能够实现2.5 Gb/s和10 Gb/s的调制器。虽然EA调制器的啁啾特性比直接调制激光器好得多，但是不如铌酸锂MZI调制器。(在理想情况下，一个外调制器应该没有啁啾，但是实际上由于残余相位调制的影响，EA调制器中将会产生一些啁啾。在铌酸锂调制器中，这种啁啾能够被精确控制住。)

2.5.5 用于拉曼放大器的泵浦源

实现2.4.4节讨论过的拉曼放大器的最大关键问题是，需要一个在正确波长的、实用的、高功率的泵浦激光器。由于仅仅在光纤中存在很高功率的泵浦信号时才能看到拉曼效应，为了提供有效的放大，泵浦功率应在数瓦量级。

已经提出了实现高功率泵浦源的几个途径。一种方法是将数个高功率半导体泵浦激光器输

出合成。从单个半导体泵浦激光二极管提取的功率被限制在几百毫瓦。能够采用波长和/或偏振复用的方法将多个半导体泵浦激光器组合起来，以获得一个带有足够高功率的复合泵浦源。

另一个挑战是实现工作于期望的泵浦波长的激光器。一个感兴趣的方法是如图2.60所示的级联拉曼激光器。

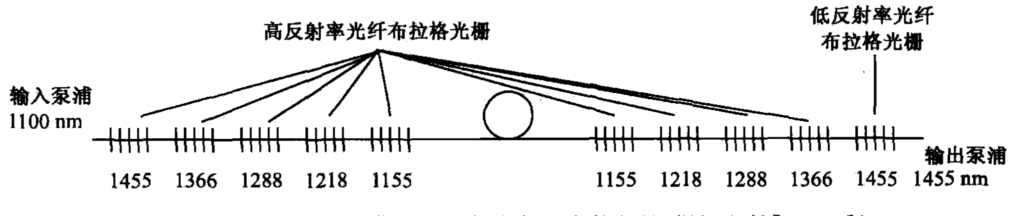


图2.60 用级联谐振器获得的高功率泵浦激光器（根据文献[Gru95]）

从一个波长可方便获得的高功率泵浦激光器出发，连续级联一系列谐振结构，应用光纤中拉曼效应本身就能得到较高波长的泵浦源。采用光纤布拉格光栅或别的滤波器结构能够容易实现单个的谐振器。在图2.60中，1100 nm波长的泵浦输入在光纤中产生了拉曼增益。用一对光纤布拉格光栅作为波长选择反射镜，在光纤中建立了一个法布里-珀罗谐振器（在2.3.5节可了解谐振器如何工作）。最里面的谐振器将初始泵浦信号转换成1155 nm波长的另一个泵浦信号。该谐振器让别的波长的信号通过。下一个谐振器将1155 nm泵浦信号转换成1218 nm的泵浦信号，原则上，能够用适当系列的谐振器级联获得任一需要的泵浦波长。该图显示了一系列级联谐振器，以获得1455 nm的泵浦输出。在末端的光纤布拉格光栅被设计成具有较低反射率，以便允许1455 nm泵浦信号输出。然后，这一泵浦信号能够被用来提供在1550 nm波长附近的拉曼增益。由于低的光纤损耗和高的光纤布拉格光栅的反射率，80%的输入光功率转换到输出。

2.6 检测器

一个接收机将光信号转换成可应用的电信号。图2.61显示了一个接收机中的各种元器件。光检测器（photodetector）产生一个正比于注入光功率的电流。前端放大器将产生的电信号功率增加到可应用的水平。在数字通信系统中，前端放大器后面接着判决电路，它由前端放大器的输出估计数据值。判决电路的设计与用来传送数据的调制方案有关。可以选择一个光放大器放在光检测器前面用做前置放大器。这一节的内容只包括光检测器和前端放大器。

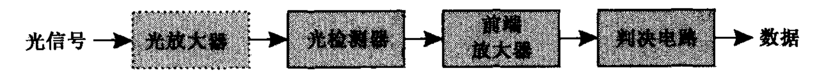


图2.61 数字通信系统中的接收机方框图

2.6.1 光检测器

光检测器的基本原理如图2.62所示。光检测器用半导体材料制作。注入到半导体上的光子被价带中的电子吸收。结果这些电子获得了较高的能量，并且被激发到导带，而在价带中留下了一个空穴。当半导体上外加一个电压时，这些电子-空穴对产生了一个电流，称为光电流（photocurrent）。

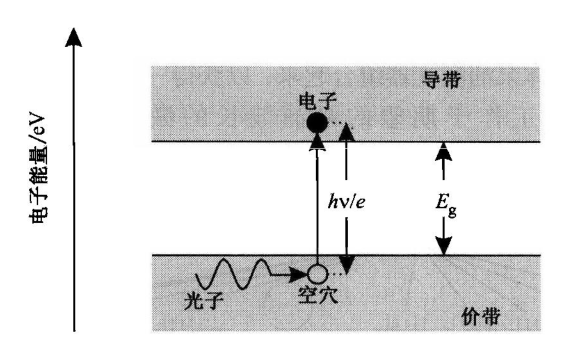


图2.62 半导体光检测器基本原理。注入光子被价带中的电子吸收，产生一个自由的或者可移动的电子-空穴对。当外加一个电压时，电子-空穴对产生了光电流

每个电子仅能够吸收一个光子以在能级之间跃迁，这是量子力学原理。因此，注入光子的能量至少等于带隙能量，以便产生光电流。这一现象也表示在图2.62中。这就给出了对频率f_c或波长λ的下述约束条件，在满足这样的条件下，带隙为E_g的半导体才能用做光检测器：

$$hf_c = \frac{hc}{\lambda} \geqslant eE_g \tag{2.19}$$

式中，c是光速，e是电子电荷。

满足式(2.19)的λ的最大值称为截止波长(cutoff wavelength)，并且用λ_{cutoff}表示。表2.2中列出了多个半导体材料的带隙能量和相应的截止波长。从该表中可以看到，众所周知的半导体材料硅(Si)和砷化镓(GaAs)不能用做1.3 μm和1.55 μm波段的光检测器。虽然锗(Ge)能够用来制作这两个波段的光检测器，但是由于它的一些缺点，降低了用于这一目的的有效性。新的复合物铟镓砷(InGaAs)或铟镓砷磷(InGaAsP)通常被用来制作1.3 μm和1.55 μm波段的光检测器。硅光检测器广泛用于0.8 μm波段。

表2.2 多个半导体材料的带隙能量和截止波长。$In_{1-x}Ga_xAs$是一个三元混合物半导体材料，其中在砷化镓(GaAs)中镓原子的$1-x$部分被铟原子代替。$In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$是一个四元混合物半导体材料，其中除去上述替代外，As原子的$1-y$部分被P原子代替。改变x和y，能够改变带隙能量和截止波长

材　料	E_g/eV	λ_{cutoff}/μm
Si	1.17	1.06
Ge	0.775	1.6
GaAs	1.424	0.87
InP	1.35	0.92
$In_{0.55}Ga_{0.45}As$	0.75	1.65
$In_{1-0.45y}Ga_{0.45y}As_yP_{1-y}$	0.75 ~ 1.35	1.65 ~ 0.92

被吸收并产生光电流的光信号能量的分数称为光检测器效率η。对于高比特率、长距离传输情况，接收机处的光能量是微弱的，因此设计光检测器使其效率η尽可能接近1是一个重要问题。使用厚度足够的半导体板可能达到这一点。厚度为L μm的半导体板吸收的功率能够写成

$$P_{abs} = (1 - e^{-\alpha L})P_{in} \tag{2.20}$$

式中，P_{in} 是注入光信号功率，α 是材料的吸收系数，因而有

$$\eta = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = 1 - e^{-\alpha L} \tag{2.21}$$

吸收系数与波长有关，在波长$\lambda > \lambda_{cutoff}$时为零。因此，在波长大于其截止波长时，半导体是透明的。α 的典型值在$10^4 cm^{-1}$量级，为了使效率 $\eta > 0.99$，需要板的厚度达到 10 μm 量级。通常，应该选择光检测器的面积足够大，以使所有注入的光功率都能够被器件收集。由于在某一波长工作的光检测器也能够用做所有更短波长的光检测器，所以，光检测器具有很宽的工作带宽。所以，为 1.55 μm 波段设计的光检测器也能够用于 1.3 μm 波段。

光检测器的特性通常用响应度 $\mathcal{R}$(responsivity)表示。如果注入光功率为 P_{in}瓦特时，光检测器产生 I_p安培的平均光电流，则响应度为

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{in}} \text{ A/W}$$

因为注入光功率 P_{in}相当于平均每秒注入 P_{in}/hf_c个光子，这些注入光子的 η 部分被吸收并产生外电路中的电子，则可写成

$$\mathcal{R} = \frac{e\eta}{hf_c} \text{ A/W}$$

通常，响应度用波长λ表示，因此有

$$\mathcal{R} = \frac{e\eta\lambda}{hc} = \frac{\eta\lambda}{1.24} \text{ A/W}$$

式中，在最后表达式中的λ用 μm 表示。由于实际上 η 可以十分接近于 1，因此在 1.3 μm 波段可以达到的响应度在 1 A/W 量级，在 1.55 μm 波段可以达到在 1.2 A/W 量级。

实际上，仅仅应用一个半导体板作为一个光检测器并不能实现高效率。这是因为许多生成的导带电子在它们到达外电路之前就和价带中的空穴复合，因此，这就需要生成的导带电子必须快速扫过并离开半导体。在这些电子产生的区域施加足够强度的电场就能做到这一点。用一个半导体 pn 结(见 2.4.5 节)代替均匀半导体板，并且在其上面施加反向偏置(reverse-bias)电压(n 型区正偏置，p 型区负偏置)，如图 2.63 所示，就能很好地达到这一点。这样的光检测器称为光电二极管(photodiode)。

在 pn 结中的耗尽区产生了一个内建电场。应用反向偏置可以增加耗尽区和内建电场。在这种情况下，在耗尽区内或接近耗尽区，由光子吸收产生的电子在它们与 p 型半导体中空穴复合之前就掠入 n 型半导体。这一过程称为漂移(drift)，并在外电路中产生光电流。类似地，在耗尽区内或接近耗尽区产生的空穴在电场作用下漂移到 p 型半导体中。

在远离耗尽区产生的电子-空穴对主要在扩散的作用下行进，并且可能在外电路中没有产生电流的情况下复合。这就降低了光检测器的效率 η。更重要的是，因为扩散是比漂移慢得多的过程，由这些电子-空穴对产生的扩散电流(diffusion current)不能很快响应注入光信号的强度变化，因而降低了光电二极管的频率响应范围。

pin 光电二极管

为了改善光检测器的效率，在 p 型和 n 型半导体之间加入一个掺杂很轻的本征半导体。这样的光电二极管称为 pin 光电二极管，这里 pin 中的 i 代表本征的含义。在这些光电二极管中，耗尽区完全扩展到整个本征半导体(或本征区)中。与本征区比较，p 型和 n 型半导体的

宽度较小，以至于很多的光吸收都发生在这一耗尽区。这就增加了光电二极管的效率，因此增加了响应度。

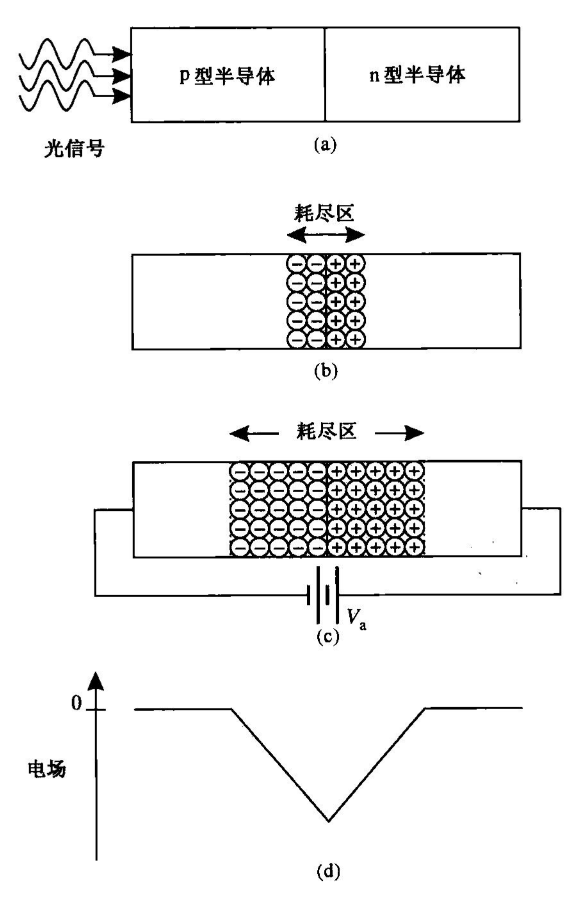


图2.63 用做光检测器的反向偏置pn-结。(a) pn结光电二极管；(b) 没有外加偏置电压的耗尽区；(c) 带有反向偏置电压V_a的耗尽区；(d) 在反向偏置时的内建电场

一种更有效的增加响应度的方法是在p型和n型区使用对感兴趣的波长透明的半导体材料。因此，感兴趣的波长大于半导体的截止波长，并且在这些区域没有吸收发生。图2.64说明了这一点，其中InP材料被用于p型和n型区，而InGaAs用于本征区。这样的pin光电二极管结构命名为双异质结(double heterojunction)或双异质结构(double heterostructure)，因为它包含两个由完全不同的半导体材料组成的结。从表2.2中看到，InP的截止波长是0.92 μm，而InGaAs的截止波长是1.65 μm。因此在1.3～1.6 μm波长范围内p型和n型区是透明的，并且光电流的扩散成分完全被消除。

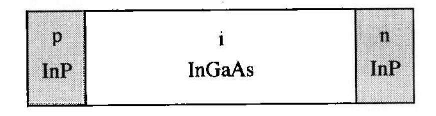


图2.64 基于异质结构的pin光电二极管。p型和n型区由InP材料制作，该材料在1.3 μm和1.55 μm波长带内透明。本征区用InGaAs材料制作，在上述两个波段具有强的吸收

雪崩光电二极管

至今，在已经叙述的光检测器中，一个光子在被吸收时只能产生一个电子，这一事实限制了器件的响应度。然而，如果产生的电子经受一个很高电场的作用，则它就能获得足够的能量从价带中撞击出更多的电子到导带中。这些二次电子-空穴对在它们被加速到足够的水平时甚至能够进一步产生电子-空穴对。这一过程称为雪崩倍增。这样的光电二极管称为雪崩光电二极管(avalanche photodiode)，或者简写成 APD。

由单个(初始)电子通过雪崩倍增过程产生的二次电子-空穴对的数量是随机的，这一数值的平均值命名为倍增增益，并用 G_m标记。一个 APD 的倍增增益可以做得足够大，甚至无限大，这就是称为雪崩击穿的情况。然而，大的 G_m值伴随着生成光电流的方差也大，它又反过来影响 APD 的噪声性能。因此，在倍增增益和噪声系数之间有一个折中。通常，设计 APD 时，使 G_m具有中等数值，从而使得它们的性能最佳。

2.6.2 前置放大器

在光纤通信系统中使用了两种前置放大器：高阻(high-impedance)前置放大器和互阻(transimpedance)前置放大器。这些放大器的等效电路如图 2.65 所示。

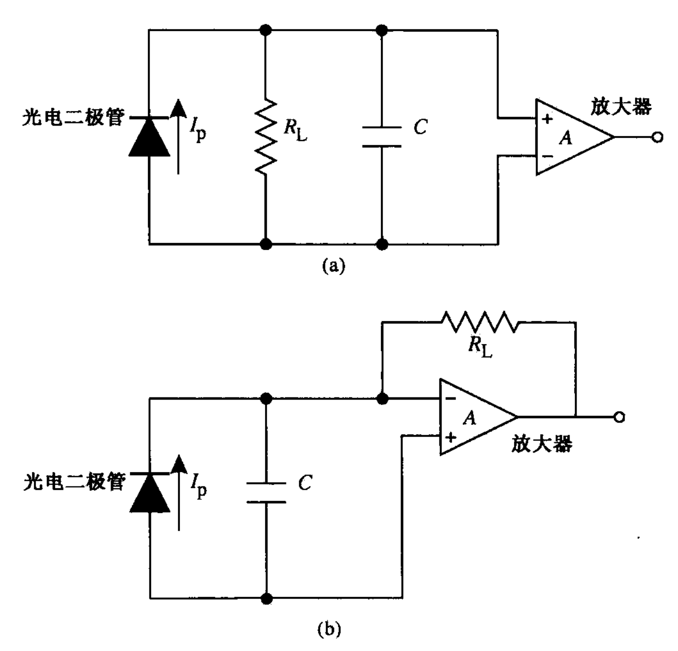


图 2.65 (a) 高阻前置放大器等效电路；(b) 互阻前置放大器等效电路

在该图中，电容 C 包含光电二极管电容、放大器的输入电容和其他杂散电容。设计的主要问题是选择负载阻抗 R_L。电子的随机运动引起的热噪声电流反比于负载电阻，该热噪声电流扰动了光电流。因此，为了最小化热噪声，必须选用大的 R_L。然而，光电二极管带宽反比于光电二极管的输出负载电阻，设为 R_p，并决定了可用比特率的上限。首先考虑高阻前置的情况。在这种情况下，$R_p = R_L$，必须选择 R_L足够小，以适应系统的比特率。因此，在光电二极管的带宽和它的噪声性能之间有一个折中。现在考虑互阻前置的情况，这时

$R_p = R_L/(A+1)$，其中 A 是放大器的增益。对于同样的负载电阻带宽，增加到 $A+1$ 倍。然而，用同样的 R_L，热噪声电流也高于高阻放大器的情况(其原因超出本书的叙述范围)，但是这一增加是不大的，通常只增加一个小于 2 的因子。因此，对于大多数光通信系统，选择互阻前置的情况多于高阻前置的情况。

选择前置放大器的另一个考虑因素是动态范围(dynamic range)。这是前置放大器能够处理的最大和最小信号级之间的差。对于许多光通信链路，这可能不是重要问题，因为被接收机接收的功率级或多或少是固定的。然而，在网络中，接收机的动态范围是很重要的问题，由于网络中光源的位置不同，接收到的信号级可能改变几个量级。互阻放大器具有比高阻放大器高得多的动态范围，这是优先选择互阻放大器的另一个因素。得到高的动态范围是因为光电流 I_p 的大的变化转换成放大器输入处的小得多的变化，当放大器增益很大时，此效应更明显。参考图 2.65(b)，可以理解这一点。光电流的变化 ΔI_p 引起了电阻 R_L 上的电压变化 $\Delta I_p R_L$(忽略流过电容 C 上的电流)。它引起放大器输入处的电压变化仅仅为 $\Delta I_p R_L/(A+1)$。因此，如果增益 A 比较大，这个电压变化就比较小。然而，在高阻放大器的情况下，在放大器输入处的电压变化将是 $\Delta I_p R_L$(再一次忽略流过电容 C 上的电流)。

场效应晶体管(field-effect transistor, FET)具有很高的输入阻抗，由于这一原因，常常被用做前置放大器。一个 pin 光电二极管和一个 FET 常常集成在同一个半导体基片上，组合的器件称为 pinFET。

2.7 光开关

光开关在光网络中具有多种用途。不同的应用需要不同的开关时间和开关端口数，如表 2.3 总结的那样。光开关的一个应用是为网络建立所需的光路。在这一应用中，光开关被用在波长互连内部，用以将它们重构以支持新的光路。其中，光开关代替了人工光纤接线板，但是大大增加了所需软件，用于端到端的网络管理，这是第 5 章和第 6 章将要详细讨论的主题。因此，对于此种应用，具有毫秒开关时间的光开关是可用的。这里的挑战是大的开关规模。

表 2.3 光开关的应用和所需的开关时间和端口数

应用类型	所需的开关时间	端口数
光路建立	1~10 ms	> 1000
保护倒换	1~10 ms	2~1000
分组交换	1 ns	> 100
外调制	10 ps	1

另一个重要的应用是保护倒换(protection switching)，这是第 6 章的主题。这里光开关用来在主光纤失效时将业务流从主光纤倒换到另一芯光纤。典型情况下，整个过程必须在几十毫秒内完成，包括检测到故障的时间、将故障通知适当的网络单元去处理倒换，以及实际的开关时间。因此，所需的开关时间在几毫秒量级。可能有不同类型的保护倒换，并且基于使用的方案，当用于波长互连时，需要的开关端口数可以从两个端口变化到数百到数千个端口。

光开关也是高速光分组交换(packet-switched)网中的重要元件。在这些网络中，光开关被用于在分组到分组的基础上交换信号。对于这种应用，开关时间必须比一个分组的持续时间小得多，并且需要大规模的开关。例如，通常的以太网分组具有长度在 60 到 1500 字节。

在速率10 Gb/s情况下，一个60字节的分组的传输时间是48 ns，因此网络的有效运行所需要的开关时间是几纳秒量级。光分组交换是第9章中讨论的主题。

光开关还有另一个用途，即作为外调制器放在激光光源前面，用以接通和关断数据信号。在这一情况下，开关时间必须是比特持续时间的一小部分。所以，用于10 Gb/s信号（相当于比特持续时间为100 ps）的外调制器必须具有大约10 ps量级的开关时间。

除去开关时间和端口数外，表征光开关适合组网应用的其他重要的特征参数如下。

1. 通断光开关的消光比（extinction ratio）是接通状态和关断状态时输出光功率之间的比值。这一比值应该尽可能大，在外调制器情况下，这一比值特别重要。尽管简单的机械光开关的消光比达到40～50 dB，但是高速外调制器往往有10～25 dB的消光比。
2. 一个光开关的插入损耗（insertion loss）是由于光开关的存在被损失的功率分数（通常用分贝表示），它必须尽可能小。由于不同的输入-输出连接，一些开关状态具有不同的损耗。这是一个不希望有的特性，因为它增加了网络中信号的动态范围。使用这样的光开关，可能需要使用可变光衰减器，以均衡跨在不同路径上的损耗。损耗均匀性（loss uniformity）主要决定于用来构建开关的结构，而不是固有技术本身，正如下面几个例子中所看到的那样。
3. 开关不是理想的。即使输入端口x名义上连接到输出端口y，但是从输入端口x来的一些功率可能会出现在其他输出端口。对于一个给定的开关状态或者一个互连图样，以及一个输出端口，串扰（crosstalk）是从希望的输入端口来到这一输出端口的功率对所有别的输入端口来到这一输出端口功率的比值。通常，一个开关的串扰定义为所有输出端口和互连模式下最坏情况时的串扰。
4. 和别的元件一样，开关应该具有低的偏振相关损耗（PDL）。当用做外调制器时，可以容忍偏置相关性，因为开关紧跟着激光器，使用特殊的保偏光纤将激光器输出的光波耦合到外调制器中，激光器输出偏振态能够得到控制。
5. 闭锁（latching）开关仍然保持它的开关状态，即使该开关的电源被切断。这是一种有点可取的特点，因为即使在电源出现故障的事件中，仍然能够让流量通过开关。
6. 开关需要具有读出功能，以使开关的当前状态能够被监控。这一点很重要，以确认已通过该开关建立了正确的连接。
7. 在电信应用中，开关的可靠性是一个重要的因素。确定可靠性的一个普通的途径是在开关的不同状态之间重复循环开关许多次，也许几百万次。然而，上面讨论过的建立光路和保护倒换的应用中，开关长期处保持一种状态，甚至维持几年的时间，随后被启动去改变状态。这里的可靠性问题是，在长时间保持不改变状态后开关实际上是否能够动作。没有长时期应用的历史更难确定这一特性。

2.7.1　大规模光开关

电信公司正在为他们的下一代光网络寻找具有几百到几千个端口的光开关。设想一个中心局处理多芯光纤，每一芯光纤携带几十到几百个波长，容易想象需要多大规模的光开关提供和保护这些波长。在第4章中，将研究采用这样的开关作为波长互连。

建立大规模光开关所需考虑的主要问题如下。

需要的开关元数目。可以采用多个开关元，以某种方式或其他方式构成大规模光开关，

如下面将要看到的那样。开关的价格和复杂性一定程度上依赖于需要的开关元数目。然而，这仅仅是影响价格的因素之一。其他因素包括封装、熔接及容易制造和控制。

损耗均匀性。正如我们在前面讨论开关特性的内容中提到的，对于输入和输出端口的不同组合，开关可能具有不同的损耗。这种情况恶化了大规模开关的特性。考虑不同输入和输出组合中的光路径上最大和最小开关元数目可以获得量度损耗不均匀性的一个方法。

交叉路径数目。下面将要研究的某些光开关是在单个基片上集成多个开关元制造的。集成电路(IC)可以在多层电路板上实现不同元件之间的连接，与此不同，在集成光学中所有这些连接必须在单层中用波导实现。如果两条波导的路径交叉，就会带来两个不希望有的效应:功率损耗和串扰。为了使开关具有可接受的损耗和串扰性能，就希望减少，或者完全消除这样的波导交叉。对于自由空间光开关来说，交叉不是一个问题，在这一节后面介绍的 MEMS 光开关就是这样。

阻塞特性。从可达到的交换功能考虑，开关具有两种形式:阻塞的(blocking)或者无阻塞的(nonblocking)。如果开关的一个未被使用的输入端口能够连接到任一未被使用的输出端口，则这一开关是无阻塞的。因此，如果一个无阻塞开关能够实现输入和输出之间的任意互联方式。如果某些互联方式不能被实现，则称开关是阻塞的。大多数应用要求开关是无阻塞的。然而，无阻塞开关还能够按照实现无阻塞特性所需的操作进一步区分。如果任一未被使用的输入端口能够连接到任一未被使用的输出端口，并且不需要任一现有的连接被重新路由，则称开关是广义无阻塞的(wide-sense nonblocking)。广义无阻塞开关通常使用特殊的路由算法实现路由各个连接，以使接下来的连接不被阻塞。一个严格无阻塞开关可以不管当前的连接如何通过这个开关，都能允许任一未被使用的输入端口连接到任一未被使用的输出端口。

如果一个无阻塞开关可能需要对某些连接进行重路由以达到无阻塞特性，则被说成是可重构无阻塞(rearrangeably nonblocking)开关。依据应用类型，连接的重路由是可以接受的，也可以是不可接受的，因为为了将连接交换到一个不同的路径，必须中断连接，至少是短暂的中断。可重构无阻塞开关结构的优点是与广义无阻塞开关结构比较，它们只使用较少的小型开关，以构建一个给定规模的较大的开关。

在可重构无阻塞结构只使用较少开关的同时，它们需要更复杂的控制算法以建立连接，但是这一控制的复杂性不是一个严重问题，只要设定这些开关中使用的当今微处理器的功能，开关就能够执行这样的算法。可重构无阻塞开关的一个主要缺点是许多应用不允许现存的连接被中断，甚至瞬时的中断，去安排一个新的连接。

通常，需要折中考虑这些不同的问题。当在下面研究使用不同结构构建大规模开关时，将阐明这一点。表 2.4 比较了这些结构的特性。

表 2.4 不同开关结构的比较。Spanke 结构的开关是由 $1\times n$ 开关组成的，而其他结构采用 2×2 开关

	无阻塞类型	开关数量	最大损耗	最小损耗
Crossbar	广义无阻塞	n^2	$2n-1$	1
Clos	严格无阻塞	$4\sqrt{2}\,n^{1.5}$	$5\sqrt{2n}-5$	3
Spanke	严格无阻塞	$2n$	2	2
Beneš	可重构无阻塞	$\frac{n}{2}(2\log_2 n-1)$	$2\log_2 n-1$	$2\log_2 n-1$
Spanke-Beneš	可重构无阻塞	$\frac{n}{2}(n-1)$	n	$\frac{n}{2}$

纵横制开关

图2.66给出了一个4×4纵横制光开关。这一开关用了16个2×2开关，适当设置这些2×2开关的状态就能实现各个输入和输出端口之间的互连。为连接输入端口1和输出端口3所需要的2×2开关的设置如图2.66所示。这一连接可以看做组成4×4开关的2×2开关网络中选取的一条路径。注意，从输入端口1和输出端口3之间存在其他的路径，然而，正如在下面所看到的，这是一条首选的路径。

纵横制结构是广义无阻塞的。为了连接输入端口i到输出端口j，选取的路径是首先横穿第i行的2×2开关直到第j列，然后穿过第j列的2×2开关，一直到达输出端口j。因此，为了建立这一连接，在这条路径上第i行和第j列中的2×2开关必须适当设置。我们将这一问题留给读者，使读者相信，如果使用这一连接规则，这一开关是无阻塞的，并且不需要现存连接的重路由。

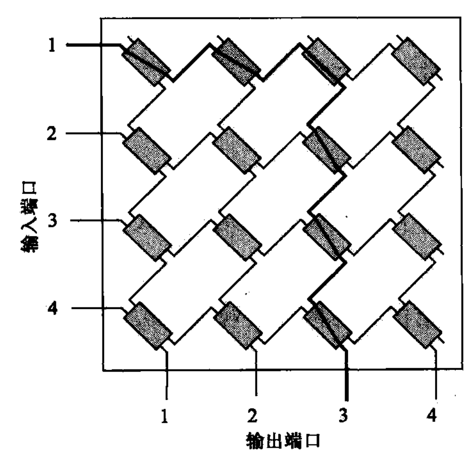


图2.66 使用16个2×2开关实现的一个4×4纵横制光开关

一般而言，一个$n \times n$纵横制开关需要n^2个2×2开关。其最短路径长度为1，而最长路径长度为$2n-1$，这是纵横制结构的主要缺点。能够制造这种开关，使其没有任何交叉路径。

Clos结构

Clos结构给出了一种严格无阻塞开关，并且是实际上被广泛用来构建大端口数的开关。图2.67表示一个三级1024个端口的Clos开关。一个$n \times n$开关可以如下构成。使用三个参量m, k, p。设$n = mk$。第一级和第三级包含$k(m \times p)$个开关。中间级包含$p(k \times k)$个开关。在第一级k个开关中每一个，连接到中间级中的所有开关。（第一级中每一个开关具有p个输出。每一个输出连接到中间级中不同开关的输入。）类似地，在第三级k个开关中每一个，都连接到中间级中的所有开关。我们将这一问题留给读者去证明，如果$p \geqslant 2m-1$，开关是严格无阻塞的（见习题2.29）。

为了使开关的成本最小，选取$p = 2m-1$。通常，每一级中单个开关采用纵横制开关结构设计。因此，每一个$m \times (2m-1)$开关需要$m \times (2m-1)$个2×2开关元，在中间级中每一个$k \times k$开关需要k^2个开关元。因而，需要的开关元总数为

$$2km(2m-1)+(2m-1)k^2$$

用$k = n/m$，我们留给读者证明：当

$$m \approx \sqrt{\frac{n}{2}}$$

时，开关元总数最小。用这一 m 值，成本最小的结构所需的开关元数近似为

$$4\sqrt{2}n^{3/2}-4n$$

这一数值大大低于纵横制开关所需要的 n^2 个开关元。

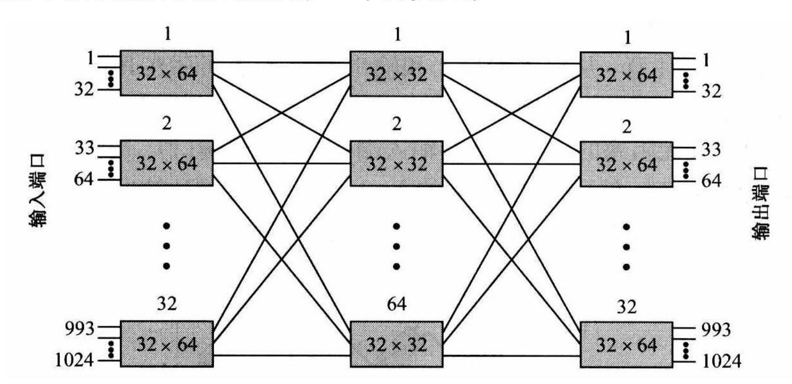


图 2.67 使用 32×64 和 32×32 个开关按三级 Clos 结构实现的严格无阻塞 1024×1024 开关

Clos 结构具有一些优点，使它适用于多级开关矩阵中。在不同的输入-输出组合之间，损耗的均匀性好于纵横制结构，并且需要的开关元数目大大小于纵横制结构。

Spanke 开关结构

如图 2.68 所示的 Spanke 结构成为构建大规模开关的一种流行结构。联合 n 个 $1\times n$ 开关和 n 个 $n\times 1$ 开关可以组成一个 $n\times n$ 开关，如该图所示。这种结构是严格无阻塞的。至今，已经计算了为构建大开关所需的 2×2 开关元的数目作为开关成本的量度。使得 Spanke 结构具有吸引力的一个优点是，在许多情况下，一个 $1\times n$ 光开关能够用单个开关元构建，而不需要用 1×2 或 2×2 开关元构建。本节后面将要讨论的 MEMS 模拟束控反射镜技术就属于这种情况。因而，只需要 $2n$ 个这样的开关元就可以构建 $n\times n$ 开关。这意味着开关成本随着 n 线性变化，这一点大大优于其他开关结构。此外，每个连接经过两个开关元，这也大大少于其他多级设计的路径中的开关元数目。与多级设计相比较，这一开关结构的插入损耗低得多。进而，对于所有输入-输出组合的光路径长度实际上能够做得相同，以至于损耗也是相同的，与特定的输入-输出组合无关。

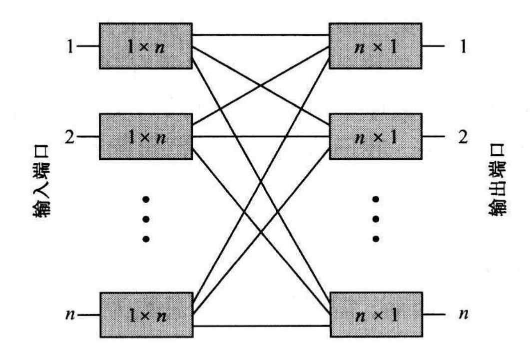


图 2.68 使用 $2n$ 个 $1\times n$ 开关按 Spanke 结构互连实现的严格无阻塞 $n\times n$ 开关

Beneš 开关结构

Beneš 开关结构是一个可重构无阻塞开关结构，从用于构建大开关所需的 2×2 开关数目

考虑，这也是最有效的开关结构之一。图2.69表示了一个仅用20个2×2开关构建的8×8可重构无阻塞开关。作为比较，一个8×8纵横制开关需要64个2×2开关。一般而言，一个$n \times n$ Beneš 开关需要$(n/2)(2\log_2 n - 1)$个2×2开关，n是2的幂。通过开关中每一路径的损耗是相同的——每一路径通过$2\log_2 n - 1$个。它的两个主要缺点是：它不是广义无阻塞的，以及需要有许多波导交叉点，使得它难以用集成光学技术制作。

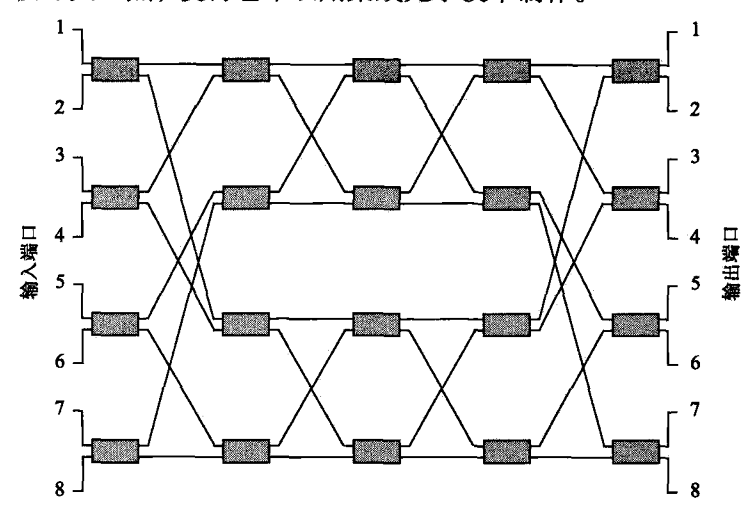


图2.69 使用20个2×2开关按Beneš结构互连实现的可重构无阻塞8×8开关

Spanke-Beneš 开关结构

图2.70是纵横制和Beneš开关结构之间的一种很好的折中，它是一个采用28个2×2开关的8×8可重构无阻塞开关，并且没有波导交叉点。这种开关结构是由Spanke和Beneš发现的[SB87]，称为n级平面结构，因为它需要n级(列)以实现$n \times n$开关。它需要$n(n-1)/2$个(2×2)开关，它的最短路径长度为$n/2$，最长路径长度为n。没有波导交叉点。它的主要缺点是：它不是广义无阻塞的，以及损耗不均匀。

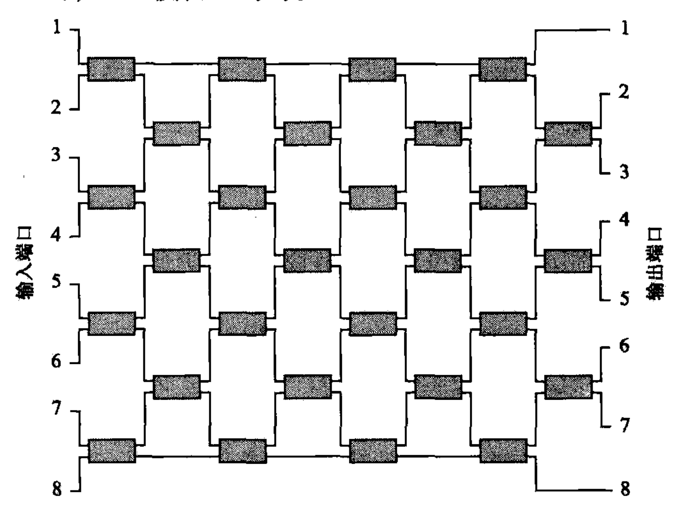


图2.70 采用28个2×2开关的8×8可重构无阻塞开关，在n级平面结构中互联时没有波导交叉点

2.7.2 光开关技术

许多不同的技术可以用来实现光开关。在表2.5中对它们的特性进行了比较。除了大规模MEMS开关外，在下一节叙述的开关都采用纵横制结构。

表2.5 不同的光开关技术的比较。机械、MEMS和基于聚合物的开关在1.3 μm和1.55 μm两波长处是以同样的方式工作的，但是，其他开关被设计成只工作在这两个波长带中的一个。表中数字表示2001年早期商用开关的参数

类型	规模	损耗/dB	串扰/dB	偏振相关损耗(PDL)/dB	开关时间
体机械开关	8×8	3	55	0.2	10 ms
二维MEMS开关	32×32	5	55	0.2	10 ms
三维MEMS开关	1000×1000	5	55	0.5	10 ms
二氧化硅热光开关	8×8	8	40	低	3 ms
液晶开关	2×2	1	35	0.1	4 ms
聚合物开关	8×8	10	30	低	2 ms
铌酸锂电光开关	4×4	8	35	1	10 ps
半导体光放大器开关	4×4	0	40	低	1 ns

体机械开关

在机械开关中，开关的功能通过某种机械方法实现。其中一种开关使用反射镜装置，在进光和出光路径上移动反射镜可以控制开关状态。另一种机械开关采用一个定向耦合器。弯曲或拉伸相互作用区的光纤，以改变耦合器的耦合比，就能够用来将输入的光波交换到不同的输出端口。

体机械开关具有低的插入损耗、低的PDL和低的串扰，并且相对来说是不贵的器件。在大多数情况下，它们可以用在纵横制结构中，这就意味着这种结构损耗均匀性有点差。不过，它们的开关速度在几毫秒量级，并且端口数相当少，例如8个到16个。由于这些原因，它们特别适合应用于监控和保护倒换中的小规模波长互连中，而不适宜应用于前面讨论的其他应用。和大多数机械元件一样，对于这些开关的长期可靠性是需要关注的问题。利用级联小型体机械开关，能够实现更大规模的开关，正如在2.7.1节中看到的一样。下面探讨的开关技术有更好的方法实现较大端口数的开关。

微电机械系统(MEMS)开关

微电机械系统(MEMS)是微型机械器件，典型的情况是用硅基片制造的。在光开关的情况下，MEMS通常代表在硅上制造的微型可移动反射镜，其大小在几百微米到几毫米范围。一个单一的硅基片提供大量的反射镜，这就意味着这些反射镜能够被制作和封装成阵列。进而，能够采用相当标准的半导体制造过程制作反射镜。能够使用各种电子启动技术，诸如电磁、静电或者压电方法，将这些反射镜从一个位置偏转到另一个位置，因此器件被命名为MEMS。在这些方法中，静电偏转特别具有功率效率，但是在大的偏转范围内进行控制有相当难度。

最简单的反射镜结构被称为两态弹起反射镜，或者称为二维(2D)反射镜，如图2.71所示。在一种状态下，反射镜是平躺着，和基片贴在一起。在这一状态下，光束不偏转。在另一种状态下，反射镜弹起到垂直位置，如果这时存在光束，它将被偏转。这样的反射镜能够被用于下面讨论的纵横制装置，以实现一个$n \times n$开关。实际开关模块的规模受基片尺寸和

工艺约束的限制，大约是 32×32 的规模。特别容易通过数字方法控制这些开关，因为只需支持反射镜两个位置状态。

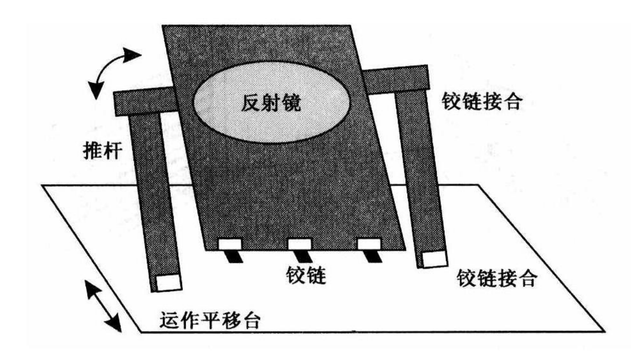


图 2.71 两态弹起的 MEMS 反射镜[LGT98]，图中示出的是弹起位置。在另一位置，反射镜移动到折叠平躺着的状态

另一种类型的反射镜结构如图 2.72 所示。反射镜通过弯曲连接到一个内部框架上，然后再通过另一组弯曲装置连接到外框架上。弯曲装置允许反射镜围绕两个不同的轴自由旋转。这一反射镜能够按模拟方式控制，以实现一个连续范围的角度偏转。该类型的反射镜有时称为模拟束控反射镜、万向节反射镜或者三维(3D)反射镜。一个这种类型的反射镜能够被用来实现 $1 \times n$ 开关。这些反射镜的控制不是一个小事情，而是需要相当先进的伺服控制机构以偏转反射镜到正确位置，并使它们保持在这一位置上。

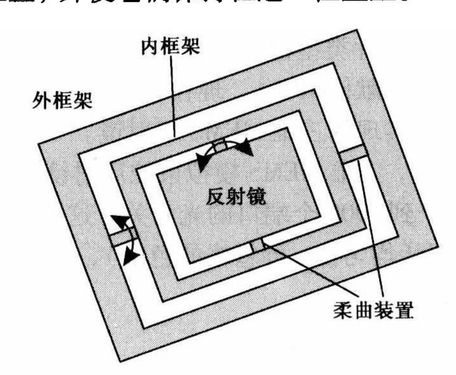


图 2.72 一个模拟束控反射镜。反射镜可以围绕两个轴自由旋转，以偏转注入光束

图 2.73 示意了使用两个模拟束控反射镜阵列构成的一个大规模 $n \times n$ 开关。这一结构相当于 2.7.1 节中讨论过的 Spanke 结构。每一个阵列具有 n 个反射镜，其中一个反射镜联系着每一个开关端口。采用一个适当的准直透镜装置，将一个输入信号耦合到第一个阵列中与它相联系的反射镜上。能够偏转第一个反射镜使得光束指向第二个阵列中任一反射镜上。为了建立端口 i 到端口 j 的连接，第一个阵列中的反射镜 i 指向第二个阵列中的反射镜 j，并且相反指向。然后，反射镜 j 可以将光束耦合到端口 j 输出。为了建立从端口 i 到另一端口，如端口 k 的连接，在第一个阵列中的反射镜 i 和第二个阵列中的反射镜 k 互相指向对方。注意，为了实现从端口 i 到端口 k 的连接交换，光束将从输出反射镜 j 扫描到输出反射镜 k，沿着这一道路通过别的反射镜。这一过程不会导致附加的串扰，因为只有在两个反射镜相互指向对

方时才能建立一个连接，而在任何别的情况下都不能建立连接。同样，注意相应于多个连接的光束在开关内相互交叉，但不会相互干扰。

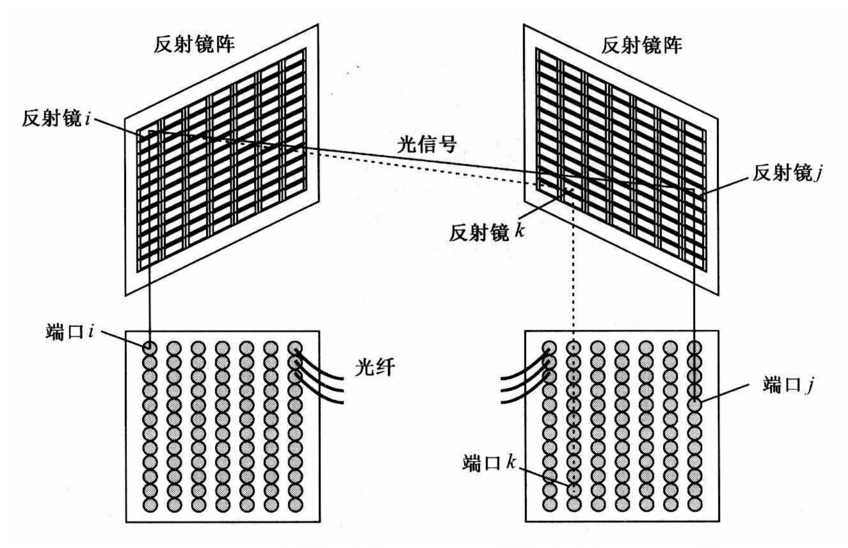


图 2.73 用两个模拟束控 MEMS 反射镜构建的 $n \times n$ 开关

有两类制造技术用于制作 MEMS 结构：表面微机械加工和体微机械加工。在表面微机械加工技术中，在硅基片顶上进行多层沉积。这些沉积层部分被蚀刻掉，留下的片段被固定在基片上，形成不同的结构。在体微机械加工技术中，MEMS 结构直接从硅晶片体进行制作。微机械加工类型和选择适当的硅基片类型都直接影响所需结构的特性。关于这些方法肯定和否定意见的更详细的讨论，可见文献[NR01]。现在可看到利用表面微加工实现的简单二维 MEMS 反射镜和用体微机械加工实现的三维 MEMS 反射镜。

在这一节讨论的各种技术中，三维 MEMS 模拟束控反射镜技术提供了最有潜力构建大规模光开关的方案，如构建 256 个到 1000 个端口的光开关。这些光开关是小型的，并且具有很好的光学特性(低损耗、好的损耗均匀性、可忽略的色散)，并且功率损耗非常低。大多数其他技术只限于用在小型开关规模中。

液晶光开关

液晶元提供了另一种实现小型光开关的方法。这些光开关通常使用偏振效应来实现开关功能。在适当设计的液晶元上外加一个电压，就能使通过液晶元的光偏振而产生旋转或者不旋转。然后，再结合利用无源偏振分束器和合束器就能够形成偏振无关的光开关，如图 2.74 所示。其工作原理与图 2.5 的偏振无关隔离器类似。通常情况下，无源偏振分束器和合束器，以及有源的开关元件都能用一个液晶元阵列实现。在液晶元中的偏振旋转不一定采用数字方式控制——它可以采用模拟方式通过控制电压进行控制。因此，这一技术同样能够被用来实现可变衰减器(VOA)。事实上，VOA 可以被纳入开关内部，以控制被耦合出的输出功率。开关时间在几毫秒量级。像气泡型的波导开关一样，液晶开关是一种固态器件，因此它能够批量生产，成本很低。

电光开关

使用 2.5.4 节研究过的一种外调制器结构能够实现 2×2 电光开关。最常用的材料是铌

酸锂($LiNbO_3$)。在定向耦合器结构中，通过改变电压可改变耦合区材料的折射率，而使耦合比产生变化。在马赫-曾德尔结构中，通过改变电压使得马赫-曾德尔干涉仪两臂之间的相对路径差产生改变。电光开关可以极快地改变其状态——通常情况下小于1 ns。这种开关时间的限制取决于电极结构的电容。

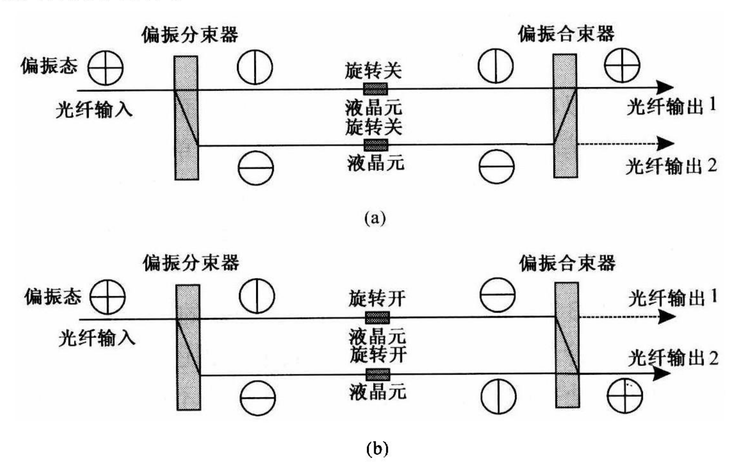


图2.74 一个1×2液晶光开关:(a) 旋转被关闭，使得光束在输出端口1输出；(b)外加一个电压在液晶元上,旋转被开通,使得光束在输出端口2输出

与机械开关比较，铌酸锂开关可以实现中等规模的集成，这也是它们的优点之一。在一块基片上集成几个2×2开关就能得到更大规模的开关。然而，它们可能具有相对较高的损耗和PDL，并且也比机械开关更贵。

热光开关

这些光开关基本上是2×2集成光学马赫-曾德尔干涉仪，它构建在波导材料上，而这些材料的折射率是温度的函数。改变干涉仪一个臂的折射率，就改变了两臂之间的相对相位差，输入信号就能从一个输出端口交换到另一个输出端口。已经在二氧化硅及聚合物基片上制作了这类器件，但是串扰性能相当差。同时，热光效应是十分缓慢的，开关速度在几毫秒量级。

半导体光放大器开关

用改变器件偏置电压的方法能够将2.4.5节介绍的SOA制作成通断型开关。如果偏置电压降低，没有达到布居数反转，则器件吸收输入信号。如果存在偏置电压，则器件放大输入信号。接通状态的放大和关断状态的吸收，使得这一器件能够达到很大的消光比。开关速度在1 ns量级。将SOA与无源耦合器件集成在一起，就能够形成较大规模的开关。然而，这是一种很贵的器件，并且难以使该器件与偏振无关，因为激光器有源区具有很强的指向性，其宽度几乎总是远远大于其高度(VCSEL除外)。

2.7.3 大规模电子开关

本节主要集中讨论光开关技术。然而，许多实用的“光学”或者波长互连装置实际上采用了电的开关结构。

通常情况下，大规模电开关采用多级设计。在大多数情况下，优先采用Clos方案，因为

它能提供一种严格无阻塞结构，并且只有相对较少的交叉点。有两种可行的方法。在第一种方法中，2.5 Gb/s 或者 10 Gb/s 的输入信号被转换成可控速率的并行比特流，如51 Mb/s，所有的信号交换都在这一种速率下进行。如果由于其他原因，需要以 51 Mb/s 为单元交换信号，这种方法是有意义的。同时在许多情况下，在电开关方案的总成本中,光电转换的成本，而不是开关矩阵本身的成本，占据较大比例。这就意味着一旦信号处于电域，就使得在细粒度进行信号交换很有意义。

另一种方法是设计开关以串行方式在线路速率下工作，而不需要将信号分割成较低速率的比特流。这种串行方式的基本单元是纵横制开关，它是像单片集成电路(IC)那样制造的。采用这些 IC 构建更大开关所需考虑的实际问题是功耗管理及各级开关之间的连接。例如，假定一个 64×64 开关的 IC 器件有 25 W 的功耗。为了构建 1024×1024 开关，需要 100 个这样的开关器件。因而，总的耗散功率大约是 25 kW。(与此对照，一个采用 3D MEMS 构建的 1024×1024 光开关仅仅耗散 3 kW 的功率，并且与一个等效的电开关比较，3D MEMS 开关整体上紧凑得多。)这种开关的冷却是一个重大问题。其他问题还有，必须处理开关模块之间的高速互联。只要开关模块都处在单一印制电路板上，互连是不困难的。然而，关于功率耗散和电路板空间的实际考虑决定了是否需要采用多个印制电路板，也许需要多个机架设备。通常情况下，在这些电路板和机架之间的互连需要工作在线速度为 2.5 Gb/s 上或者更高。为了这一目的，可以采用高质量的电互联或光互连。为了电互联，所需的驱动器也耗散大量的功率，可能的互连距离也是受限制的，通常在 5 ~ 6 m 范围。光互连应用于阵列激光器和接收机，以及带状光纤光缆。这些只需要较低的功率耗散，以及长得多的电路板之间的距离，通常可以达到大约 100 m 或者更长。

2.8 波长变换器

波长变换器是一个将数据信号从某一输入波长转换到另一个输出波长的器件。由于三个主要的原因，波长变换器是 WDM 网中的重要元件。首先，进入网络的某一数据信号的波长不适合在网络中使用。例如，第 3 章中讨论的第一代网络通常在 1310 nm 波长窗口利用 LED 或者利用法布里-珀罗激光器传输数据。无论是波长还是激光器类型，都不适合于 WDM 网络。所以，在网络的输入和输出处，数据信号必须从这些波长转换到 1550 nm 波长范围的窄带 WDM 信号。用于实现这一功能的波长变换器称为转发器(transponder)。

其次，在网络中可能需要利用波长变换器改进网络链路上可用波长的利用率。该课题将在第 7 章中详细研究。

最后，如果不同的网络由不同的公司管理，而这些公司没有协调其网络中波长的配置，则在这些不同的网络之间边界上需要波长变换器。

波长变换器按照其输入和输出处所能处理的波长范围进行分类。一个固定输入和固定输出的器件总是采用一个固定输入波长，并将该波长转换到固定的输出波长。一个可变输入和固定输出的器件采用多种波长，但是总是转换输入信号到固定的输出波长。一个固定输入和可变输出器件具有相反的功能。最后，一个可变输入和可变输出的器件能够转换任意输入波长到任意输出波长。

除输入和输出处的工作波长范围外，也需要考虑变换器能够处理的光功率范围，变换器是

否对输入信号的比特率和调制制式透明，以及它是否引入附加的噪声和信号相位的抖动。后两个特性依赖于变换器中使用的再生类型。对于全光波长变换，偏振相关损耗也应该保持最小。

有四种实现波长变换的基本方法：(1) 电光方法，(2) 光选通方法，(3) 干涉仪法，(4)四波混频法。后三种方法都是全光方法，但是现在用于商用还不够成熟。在较低价格的条件下，当前电光变换器比相应的全光波长变换器可提供好得多的性能。

2.8.1 电光方法

这也许是当前实现波长变换的最简单、最明显、最实际的方法。如图2.75所示，输入信号首先从波转换成电的形式，接着再生，然后用一个不同波长的激光器再发送出去。通常，这是一种可变输入、固定输出的变换器。通常，接收机不需要考虑输入波长，只要它在1310 nm或1550 nm的波长窗口。所用激光器通常是固定波长激光器。用一个可调谐激光器能够获得可变输出波长。

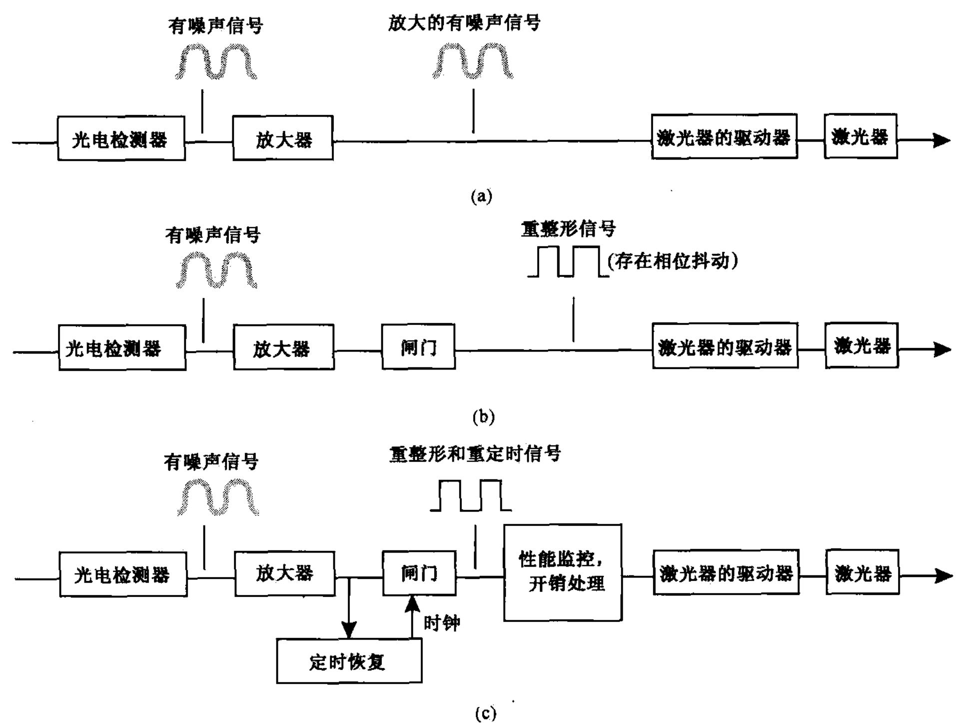


图2.75 不同类型的电光再生。(a) 1R(不重整波形和不重定时的再生)；(b) 2R (重整波形但不重定时的再生)；(c) 3R(重整波形和重定时的再生)

变换器的性能和透明性依赖于所用再生的类型。图2.75表示了可能的不同再生类型。在最简单的情况下，接收机只将输入光子变换成电子，再用模拟射频(radio-frequency, RF)放大器放大，并驱动激光器。这被称为1R再生。这种形式的变换是真正对调制制式透明(倘若使用合适的接收机去接收信号)，并且同样能够处理模拟数据。然而，在变换器处加进了噪声，并且非线性和色散效应将会产生累积。

另一种选择是使用重整波形但不重定时的再生，也称为2R再生。这仅能用于数字数据。信号通过逻辑门发送，使其重整波形，但是没有重定时。由于这一过程引进了附加的相位抖动，最终限制了能够级联的级数。

最后一种是采用重整波形和重定时的再生(3R)。这就完全消除了非线性、光纤色散和放大器噪声的影响；此外，它不引入任何附加的噪声。然而，定时是相对特定比特率的功能，这就失去了透明性。如果透明性不是很重要，这是一个很有吸引力的方法。(注意，在第5章中讨论了使用3R且能维持某些透明性的另一种方法，即称为数字包封的方法。)这些类型的再生装置常常包括电路(以实现性能监控)，以及处理和改变与信号相联系的相关管理开销。在3.1节和5.5.7节中将能找到其中的一些开销。

2.8.2 光选通方法

光选通(optical gating)方法利用一种光器件，它的特性随输入信号的强度改变。这一改变能够转移到通过器件的另一不同波长的未调制探针信号上。在输出处，探针信号包含了输入信号上的信息。如同光电方法一样，这些器件是可变输入，但可以是固定输出或者可变输出的器件，依赖于探针信号是固定的还是可调谐的。这一方法提供的透明性是有限的，只有强度调制信号能够被转换。

使用这一原理的主要技术是交叉增益调制(CGM)，它使用了半导体光放大器(SOA)中的一种非线性效应。这种方法可用的信号和探针波长的范围很宽，只要这些波长在放大器增益带宽内，大约100 nm范围即可。早期的SOA是偏振敏感的，采用仔细的制造技术可能使它们对偏振不敏感。SOA也会在信号中加入自发辐射噪声。

CGM使用了SOA的增益对输入功率的依赖性，如图2.76所示。当输入功率增加时，SOA增益区中的载流子逐渐耗尽，引起放大器增益的下降。这一效应令人感兴趣的一个性质是，SOA中的载流子动力学过程是很快的，发生在大约1 ps的时间范围。因此，增益随输入功率起伏的响应可以一个比特到一个比特变化。器件能够处理的比特率高达10 Gb/s。如果不同波长的低功率探针信号被送入SOA，则当输入信号为“1”比特时，探针信号将经受低的增益，而输入信号是“0”比特时，将经受高增益。当多个不同波长的信号被单个SOA放大时，同样的效应产生了串扰，这一效应使得SOA相对来说不适合放大WDM信号。

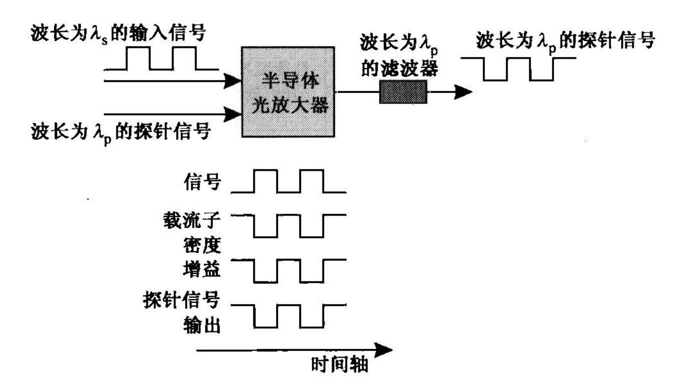


图2.76 利用半导体光放大器中的交叉增益调制实现的波长变换

CGM的优点是概念简单。然而，它存在几个缺点。可达到的消光比比较小(小于10)，因为输入“1”比特时SOA的增益实际上没有降到0。输入功率必须很高(大约0 dBm)，以使放大器足够饱和，而让增益产生明显的变化。必须在放大器输出处使用适当的滤波技术，滤除高功率的输入信号，除非信号与探针反向传输。还有，当SOA中的载流子密度变化时，同样也改变了折射率，接着就会影响探针信号的相位，产生很大的脉冲畸变。

2.8.3 干涉仪技术

在 CGM 中产生脉冲畸变的相位变化效应也能够用来实现波长变换。当放大器中的载流子密度随输入信号变化时，它就产生了折射率的变化，接着调制了探针信号的相位。在这一方法中用了交叉相位调制这一术语。使用一个干涉仪，例如，马赫-曾德尔干涉仪(MZI)(见2.3.7节)，能够将这一相位调制转换成强度调制。图2.77表示了利用交叉相位调制实现波长变换的一个可能的结构。MZI 的两臂具有精确相同的长度，每个臂上各有一个 SOA。信号在其一端(A)送入，探针信号从另一端(B)送入。如果不存在信号，则输出的探针信号没有调制。MZI 中的耦合器被设计成具有不对称耦合比 $\gamma \neq 0.5$。当存在信号时，它在每个放大器中引起一个相位变化。每个放大器引起的探针信号的相位变化是不同的，因为在两个放大器中存在的信号功率不同。MZI 将在两臂之间探针信号的相位差转换成输出处的强度调制信号。

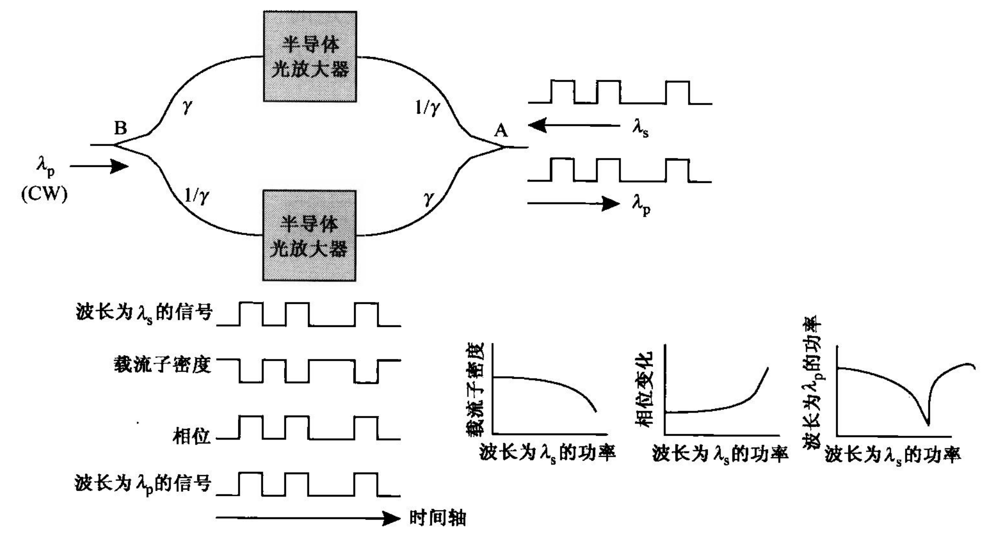


图2.77 在马赫-曾德尔干涉仪中嵌入半导体光放大器，以形成交叉相位调制的波长变换

这一方法具有一些令人感兴趣的特性。能够调节 MZI 的自然状态(没有输入信号)，使得探针信号通过 MZI 时或者产生相消相干，或者产生相加相干。因而，能够选择输出数据是否与输入数据同相或者互补。

相对于 CGM 方法，这一方法的优点是，与较大的增益偏移比较，为了达到较大的相位移只需要小得多的信号功率。事实上，能够应用一个低信号功率和一个高探针功率，因而这一方法比 CGM 方法更有吸引力。这一方法也能够产生较好的消光比，因为能够使用干涉仪将相位变化转换成“数字的”振幅调制输出信号。所以，这一器件提供了带有重整波形的 2R 脉冲再生。依赖于 MZI 运行的位置，探针信号能够被调制，极性可以和输入信号相同，或者相反。参照图2.77，图中画出了耦合输出的探针波长的功率相对于信号波长的功率之间的关系图，依赖于解复用器的斜率，信号功率的增加既能减少也可以增加耦合输出的、探针波长的功率。与 CGM 一样，能够处理的比特率最多是 10 Gb/s，并且受载流子寿命的限制。然而，这一方法需要对 SOA 的偏置电流进行严格的控制，因为小的偏置电流变化产生了折射率的变化，它将大大影响通过器件的信号相位。

已经看到，CPM 干涉仪方法提供了带有重整波形的(2R)脉冲再生。正如在早先看到的，当 2R 再生清除了信号中干扰的同时，不能消除信号中的相位(等效于定时)抖动，它将在每个这样的 2R 再生级积累。为了完全消除信号中的各种干扰，包括对瞬时特性的影响，需要重整波形和重定时的(3R)再生。图 2.78 表示了一种不需要采用光电变换而在光域实现 3R 的建议[Chi97, Gui98]。这一方法联合了 CGM 和 CPM 方案。假定一个本地时钟可用于对输入信号取样。这一时钟需要从数据中提取；在 9.2 节中将研究它的实现途径。再生器包含三级。第一级对信号取样。它利用了 SOA 中的 CGM。使用不同波长的两个独立信号探测输入信号。这两个探测信号被同步并且调制在两倍输入信号的数据速率上。由于时钟是可用的，探测信号的相位被调整到在比特持续期间的中点对输入信号取样。在第一级的输出处，当存在输入信号时，两个探针信号的功率级被降低，而没有输入信号时则有较高的功率级。在第二级，一个探针信号相对于另一个探针信号延迟半个比特周期。在这一级的输出处合成的信号的比特率与输入信号比特率相匹配，并且已经再生和重定时。然后，这一信号通过基于 CPM 的干涉仪型变换器级发送出去，信号被再生和重定时，以产生一个输出信号。这时，这一输出信号已经再生、重定时和重整波形。

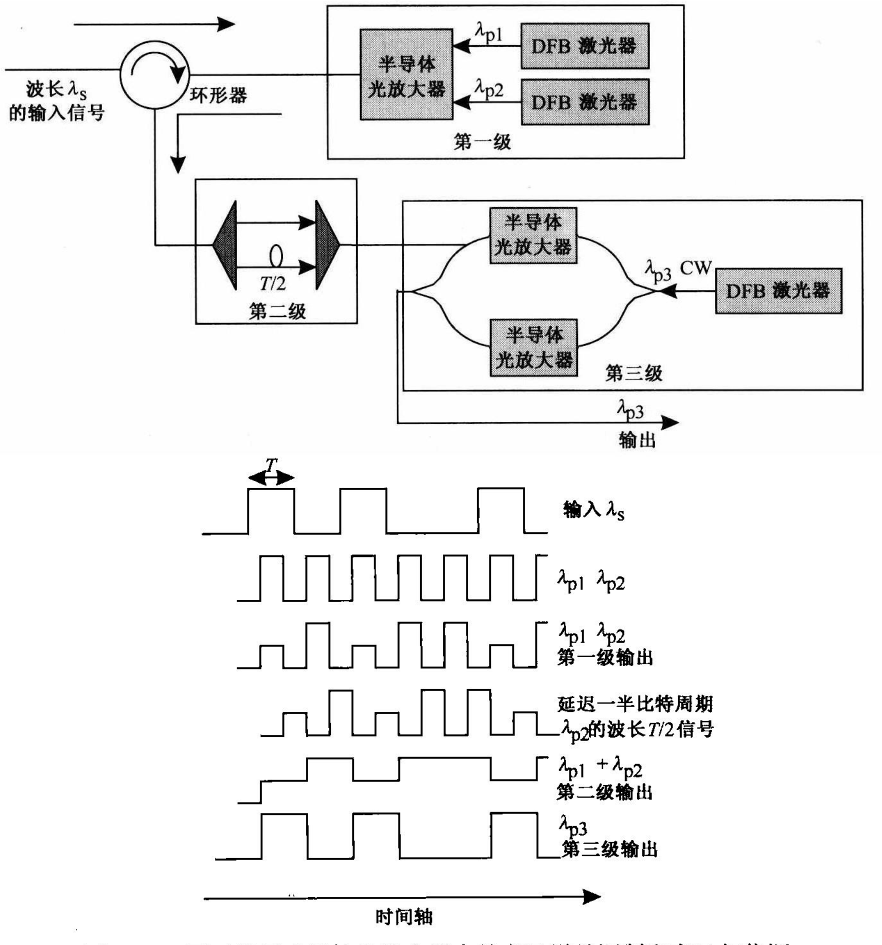


图 2.78　同时采用半导体光放大器中的交叉增益调制和交叉相位调制，以实现重整波形和重定时的(3R)全光再生[Chi97]

2.8.4 四波混频技术

由传输介质中的非线性而引起的四波混频现象也能够被利用来实现波长变换。回忆频率为f_1、f_2和f_3的三个波可以通过四波混频的作用产生频率为$f_1+f_2-f_3$的第四个波，当$f_1=f_2$时得到频率为$2f_1-f_3$的波。令人感兴趣的四波混频的特性是生成的光波能够与相互作用的光波同处在一个波带中。正如在2.5.8节中看到的，在光纤中产生的四波混频信号的功率非常小，但如果存在这一效应，则会产生串扰(见2.8.4节)。

为了实现波长变换的目的，采用SOA能够增强四波混频的功率，因为在器件内部具有较高的场强。如果信号频率为f_s，探针频率为f_p，则四波混频将产生频率为$2f_p-f_s$和$2f_s-f_p$的信号，只要这些频率都处在放大器的带宽内(如图2.79所示)。

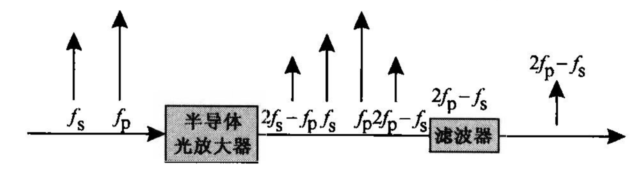


图2.79 利用半导体光放大器中四波混频实现波长变换

四波混频技术的主要优点是它是真正透明的，因为这一效应不依赖于调制格式(在混频过程中，振幅和相位信息两者都保留下来了)和比特率。其缺点是在SOA输出处必须滤除别的频率波，并且当信号和探针之间的波长差增加时，变换效率将大大下降。

总结

本章研究了许多不同的光元器件。耦合器、隔离器和环形器都是常用的元器件。许多研究过的光滤波器都可以买到，光纤光栅、薄膜多腔滤波器和阵列波导光栅已用于商用WDM系统中。

掺铒光纤放大器(EDFA)已被广泛采用，确实已成为WDM系统中的关键使能器件。EDFA的设计能够结合多级技术和增益平坦滤波器，并且在多级之间提供中间接入，以便插入别的单元，如色散补偿模块和波长分插(上下路)复用器。分布拉曼放大器正在与EDFA联合，用在超长距离的系统中。①

半导体激光器也已经商用。半导体DFB激光器被用在大多数高速通信系统中，以及小型可调谐半导体激光器中。当前，高速APD和pinFET接收机两者都已商用。

存在各种技术可用来构造光开关。基于MEMS的光开关适用于构造具有中等或大端口数的波长选择开关。大多数开关技术都能用于较小规模的光开关中。开关技术也能用于其他系统，例如，MEMS和液晶技术能够用在各种光衰减器中。

全光波长变换器仍然处在实验室研究阶段，在实用化之前需要等待价格的大幅下降和性能的改进。

① 当前一些超长距离系统中也可单独使用分布拉曼放大器——译者注。

进一步阅读材料

由格林(Green[Gre93])写的书更详细地讨论了本章讲述的许多光元器件，特别是可调谐光滤波器和激光器。也可参看文献[KK97]，以了解许多元器件更新的内容。

所介绍的大多数滤波器现在已经商用。已经在一些光学教材中详细介绍了光栅，如文献[KF86，BW99]。在文献[LL84]和文献[Gre93]中介绍了 Stimax 光栅。为了了解光纤光栅的制造和特性可以看文献[CK94，Ben96，Kas99]，对于长周期光栅的应用可看文献[Ven96b，Ven96a]。有关介质薄膜多腔滤波器如何工作的问题可以看文献[SS96]和文献[Kni76]。一些文献提供了理解这些滤波器工作所必需的电磁理论基础知识，如可看文献[RWv93]。关于阵列波导光栅的早期文章有文献[DEK91]和文献[VS91]。在文献[McG98，TSN94，TOTI95，TOT96]中叙述了它们的工作所依赖的原理。在文献[SBJC90，KSHS01]中叙述了集成光学 AOTF 的工作原理，它的系统应用在文献[Che90]中讨论。能够在文献[Tom08]中找到无源光学元器件技术的综述。

关于光放大器的文献非常广泛。对于 EDFA，可看文献[BOS99，Des94]，对于 L 带 EDFA 的概述可看文献[Flo00]，而关于 SOA 的辅导材料可看文献[O'M88]。文献[Tie95，SMB00，FDW01]提供了增益钳制 SOA 的一些近期工作的例子。对于拉曼放大器的综述，可看文献[NE01，NE00]和文献[KK97，Chapter]。

有一些专门讨论激光器主题的教材，例如，可看文献[AD93]。在文献[Yar97]中详细讨论了激光振荡和光检测。文献[JQE91]是几个有关激光器课题的很好的参考书。关于激光器的其他很好的辅导材料出现在文献[BKLW00，LZ89，Lee91，SIA92]中。在文献[Har00，Koy06]中能够找到垂直腔激光器的概述，也可看文献[MZB97]。当前，大多数半导体激光器都应用量子阱结构。文献[AY86]给出了这一课题的很好的介绍，文献[SI08]给出了另一个有关的综述和历史展望。锁模技术的数学理论在文献[Yar89]和文献[Yar65]中说明。在文献[Agr95]中给出了光纤激光器的各种锁模方法的广泛讨论。在文献[Woo00]和文献[KK97，Chapter 9]中清楚地介绍了铌酸锂外调制器，而在文献[BKLW00]和文献[KK97，Chapter 4]介绍了电吸收调制器。

现今，正在进行不懈努力，以实现可以商用的可调谐激光器。为了在这一课题上进行更深入的探索，建议读者参看文献[Col00，Har00，AB98，Gre93，KK97]。关于可调谐激光器实现途径的一个早期评述出现在文献[KM88]中。文献[Vak99]叙述了 VCSEL 基可调谐激光器。别的类型的可调谐 VCSEL 已经被验证了，如可看文献[CH00，Har00]。取样光栅激光器结构在文献[JCC93]中进行了描述，而超结构光栅激光器在文献[Toh93]中有描述。为了了解有关 GCSR 激光器的细节，可参看文献[WMB92，Rig95]。在文献[Soo92，ZJ94，Zir96]中，给出了实现阵列外光栅基激光器的建议。

可在文献[Per08]中找到关于光检测器和接收机的综述。

由 Spanke 写作的辅导文章[Spa87]是一篇有关用于光交换中大规模开关结构的很好的文章。为了很好地收集关于光交换的文章，也可看文献[MS88]，而文献[Clo53]是关于 Clos 开关结构的原创文章。由 Beneš 写的经典著作[Ben65]是为电话应用发展的大规模开关结构的数学理论方面的权威性参考书。

在文献[Kas95, Chapter 13]能够找到有关机械开关的非常易懂的概述。几篇文章[NR01, LGT98, Nei00, Ryf01, Lao99, WSF06]叙述了基于MEMS的开关。在文献[Fou00]中叙述了基于喷墨技术的波导开关。关于液晶开关，可看一些早期文章[WL96, PS95]。

在文献[Stu00, EM00, NKM98, Yoo96, ISSV96, DMJ+96, Chi97]中，有不同类型波长变换的概述和比较。

习题

2.1 考虑图2.80中的一个3 dB 2×2耦合器。假定用一段光纤连接耦合器的两个输出端口。一个光信号在第一个输入端口送入耦合器。问将会发生什么情况？推导这一器件的场传递函数。假定使用的耦合器是可逆器件，即如果它的输入和输出互换，则器件能够完全一样地工作。提示:这一器件称为环镜。

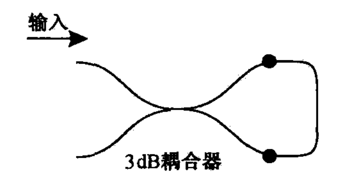


图2.80 一个3 dB耦合器，它的两个输出端口用一段光纤连接在一起

2.2 考虑一个三端口器件，希望在端口1和端口2输入的能量全部送入端口3。为了普遍性，假定所有端口都能用做输入和输出。这样的器件的散射矩阵为

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}0 & 0 & s_{13}\\ 0 & 0 & s_{23}\\ s_{31} & s_{32} & s_{33}\end{pmatrix}$$

证明这样形式的散射矩阵不能满足能量守恒条件(2.4)。因此，不可能构建将两个输入端口输入的功率全部无损耗地送到第三个端口的器件。

2.3 考虑一个隔离器，它是一个两端口器件，其中功率必须从端口1转移到端口2，而一定没有功率从端口2转移到端口1。这样的器件的散射矩阵能够写成

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}s_{11} & s_{12}\\ 0 & s_{22}\end{pmatrix}$$

证明这样形式的散射矩阵不能满足能量守恒条件(2.4)。因此，在隔离器中存在损耗，因为在端口2输入的功率必须被器件吸收，而从端口1输入的功率能够无损耗地转移到端口2。

2.4 在图2.10中，证明当光栅节距a比光栅平面到光源和像平面的距离小的情况下，经过相邻两个隙缝并具有衍射角θ_d的两条射线之间的路径差近似为$a[\sin(\theta_i)-\sin(\theta_d)]$。

2.5 推导闪耀角为α的闪耀反射光栅(如图2.11所示)的光栅方程。

2.6 推导具有N个窄隙缝、隙缝间距为d的光栅衍射图样的振幅分布。证明当$d\sin\theta=m\lambda$时，衍射振幅达到最大值。讨论在$N\to\infty$的极限下会产生什么情况。

2.7 证明对于固定的f_0和Δf，一个法布里-珀罗谐振腔的谐振频率为f_n满足$f_n=f_0+n\Delta f$，其中n为整数。因此，这些谐振频率是等间隔分布。注意，相应的波长不是等间隔分布。

2.8 推导法布里-珀罗滤波器的功率传递函数。

2.9 推导法布里-珀罗滤波器细度的表达式(2.13)。假定反射镜的反射率R接近1。

2.10 证明通过法布里-珀罗滤波器传输的功率与所有频率的输入功率的比值为$(1-R)/(1+R)$。注

意，对于很高的 R 值，这一比值是很小的。因此，当考虑所有频率时，只有输入功率的很小的部分通过具有高反射端面的法布里-珀罗滤波器传输。

2.11 考虑两个法布里-珀罗滤波器级联工作，其腔长分别为 l_1 和 l_2。假定两个滤波器的反射镜的反射率为 R，它们的腔的折射率为 n。忽略从第二个腔到第一个腔的反射，以及相反路径的反射。求级联腔的功率传递函数。如果 $l_1/l_2 = k/m$，其中 k 和 m 是相对的素数，求级联腔的自由谱区的表达式。将所求的自由谱区用各个腔的自由谱区表示。

2.12 证明如图 G.1(b)所示的介质平板滤波器的传递函数与具有端面反射率为

$$\sqrt{R} = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$$

的法布里-珀罗滤波器的传递函数一样，假定 $n_3 = n_1$。

2.13 考虑 $2k$ 个低折射率(n_L)介质薄膜和高折射率(n_H)介质薄膜交替放置的一种层叠薄膜结构。设其中每一层薄膜都是波长 λ_0 的四分之一厚度。用 2.3.6 节的符号，这一层叠薄膜结构能够表示为 $(HL)^k$。求这个层叠薄膜结构作为光波长 λ 的函数的反射率。因而，单腔介质薄膜滤波器能够被看做反射率与波长相关的法布里-珀罗滤波器。

2.14 推导马赫-曾德尔干涉仪的功率传递函数，假定干涉仪的两个输入端口中只有一个有输入信号。

2.15 考虑 2.3.7 节中的马赫-曾德尔干涉仪。

(a) 借助于方框图，证明使用 $n-1$ 个 MZI 能够构建 $1 \times n$ 解复用器。假定 n 是 2 的幂次。详细说明每个 MZI 中必须采用的路径长度差 ΔL。

(b) 如果只需要将一个特定的信号和其他 $n-1$ 个信号分开，能否简化所给出的结构?

2.16 考虑如图 2.26 所示的罗兰圆结构。证明一个固定的输入波导和任意两个相邻的阵列波导之间路径长度是常量。假定阵列波导所在弧的长度比较罗兰圆的直径小得多。提示:选择笛卡儿坐标系，它的原点处在罗兰圆与光栅圆相切的点。现在，在该坐标系表示一个任意输入(输出)波导和一个任意阵列波导之间的欧几里得(Euclidean)距离。用前述假定简化表达式。最后，注意在阵列波导之间的垂直距离是常量。按照本书的符号，可以表示为 $\delta_i = d\sin\theta_i$，其中 d 是相邻阵列波导之间的垂直距离，θ_i 是从原点测量的第 i 个输入波导到中心输入波导之间的角距离。

2.17 推导固定输入波导 i 和固定输出波导 j 的一个 AWG 的自由谱区(FSR)。FSR 依赖于输入和输出波导。但是，如果各个输入和输出波导所处的罗兰圆上的弧长(见图 2.26)是小量，则证明 FSR 近似是常量。利用习题 2.16 中的结果 $\delta_i = d\sin\theta_i$。

2.18 考虑一个 AWG，它满足习题 2.17 给出的关于其 FSR 近似与输入和输出波导无关的条件。给定 FSR，确定为了使 AWG 具有如图 2.25 所示的波长路由器功能所必须选择的波长系列。假定输入(和输出)波导之间的角度差是常量。利用习题 2.16 中的结果 $\delta_i = d\sin\theta_i$。

2.19 设计一个 AWG，它能够复用/解复用 1.55 μm 波带中的 16 个 WDM 信号，频率间隔为 100 GHz。除其他项目外，设计还必须规定输入和输出波导之间的间隔、相邻阵列波导之间的路径长度差、光栅圆的半径 R 和 AWG 的 FSR。假定输入/输出波导和阵列波导的折射率为 1.5。注意，设计可能不是唯一的，首先必须合理选择某些参量，再依次决定其他参量。

2.20 证明声光滤波器半高全宽(FWHM)带宽约为 $0.8\lambda_0^2/l\Delta n$。

2.21 解释如图 2.28 所示的偏振无关声光可调谐滤波器在两个输入端口都存在信号时，如何用做两个输入、两个输出的波长路由器。

2.22 计算为了使 AOTF 在工作波长 1.55 μm 处具有 1 nm 通带宽度(FWHM)所需的声光相互作用长度。假定 $\Delta n = 0.07$。

2.23 考虑一个 16 信道 WDM 系统，其中信道之间的标称间隔为 100 GHz。假定用 1 dB 带宽为 2 GHz 的滤波器选出各信道中的一个信道。考虑用于这一目的的三种不同的滤波器结构。

- 法布里-珀罗滤波器:假定信道的中心波长没有漂移。当法布里-珀罗滤波器的细度和反射镜的

相应反射率是多少时，使得该滤波器的被选信道与每个相邻信道之间的串扰抑制达到 30 dB？如果允许信道的中心波长偏离它们的标称值达 ±20 GHz，则所需的细度和镜面反射率是多少？

- 马赫-曾德尔干涉仪：假设上述器件采用如图 2.21(c)所示的级联 MZI 来实现，并且必须达到同样的串扰抑制水平。求当信道中心波长在固定的和允许漂移 ±20 GHz 两种情况下时，所需的路径长度差 ΔL 和级数是多少？
- AOTF：如果采用 AOTF，则问能否达到同样水平的串扰抑制？

2.24 本习题是比较各种简单的分插(上下路)复用器结构。

(a) 首先考虑如图 2.14(b)所示的基于光纤布拉格光栅的分插复用单元。假定用一个 5% 的分支耦合上路信号到输出端口，并且光栅对传输信号引起的损耗为 0.5 dB，对于反射信号则没有损耗。假定每通过环形器一次引起的损耗为 1 dB。仔细计算下路信道、上路信道和通过器件的信道所经历的损耗。假设每一信道的输入功率为 -15 dBm。上路信道应该送入多大功率才能使输出处所有信道的功率是相同的？

(b) 假设必须构建一个分插复用器，它能够上路和下路四个波长信号。实现这一点的途径是串行级联 4 个如图 2.14 形式的上下路单元。在这种情况下，计算上路信道、下路信道和通过器件的信道所经历的最好的和最坏的损耗。

(c) 实现四信道分插复用器的另一个方法如图 2.81 所示。对于这种结构，重复前面的习题计算。假定损耗如图所示。从损耗的观点看，你愿意选择两个方案中哪一个？

(d) 假定每个光纤光栅价格为 500 美元，每个环形器价格为 3000 美元，每个滤波器价格为 1000 美元，每个分路器、合路器和耦合器价格为 100 美元。从成本观点看，在上述结构中你宁愿选择哪一个？

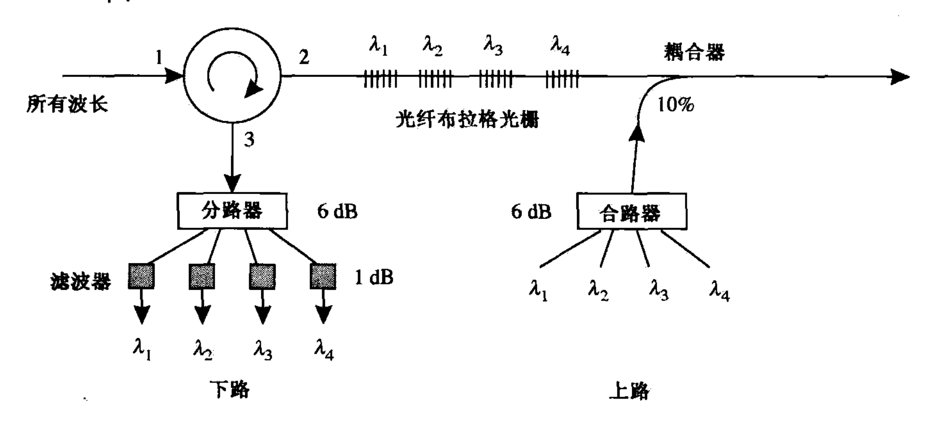


图 2.81 一种四信道分插复用器结构

2.25 在光检测器中，为什么导带中的电子不吸收注入光子？

2.26 考虑一个 EDFA，它需要放大 C 带中 1532 nm 和 1550 nm 之间的波长(间隔 100 GHz)。

(a) 画出这一基本的 EDFA 的示意图，并假定选择泵浦激光器，使 ASE 噪声最小。同时，确保能够防止 EDFA 输入和输出处的后向反射。

(b) 画出相关的能带，以及这些能带之间相关联的能量跃迁。

(c) 在这一范围内，能够放大多少个波长(以及波长间隔是多少)？

(d) 计算为支持整个波长范围所需的能量跃迁范围。

(e) 假定希望：(1) 在 EDFA 中上下路这些波长的一个子集，(2) 增加第二级，使它最适合于输出最大功率。请画出这一新的两级 EDFA，其中分插复用功能画成标注“ADM”的黑盒子。

(f) 现在集中考虑这个“ADM”，假定两个光纤布拉格光栅(以及相关联的环形器、分路器和滤波

器)被用来提供这一频谱范围内最低两个相邻波长的固定下路功能。此外，一个合路器被用于随后上路两个与下路波长相同的信号(当然，携带不同的负载信号)。画出这种 ADM 的架构(即黑盒子的内部结构)。

(g) 如果 ADM 光纤段的有效折射率为 1.5，计算相关的光纤光栅周期。

2.27 如图 2.66 所示，考虑用 2×2 开关组成的 4×4 开关。假定每个 2×2 开关具有 50 dB 的串扰抑制。4×4 开关总的串扰抑制多大? 现在假定功率能够增加，并且不需要担心个别电场同相叠加，如果希望达到 40 dB 的总串扰抑制，则每个开关的串扰抑制应该多大?

2.28 这一习题考虑维纳(Vernier)效应，它被用来在给定单个小周期滤波器的条件下得到具有大周期的滤波器。考虑两个周期性滤波器，一个具有周期f_1，另一个具有周期f_2，假定两个周期都是整数。换言之，第一个滤波器选择$f = mf_1$，其中m是整数，而第二个滤波器选择波长$f = mf_2$。如果两个滤波器级联，证明合成的滤波功能是周期性的，其周期为f_1和f_2的最小公倍数。例如，两个滤波器的周期为 500 GHz 和 600 GHz，则级联结构是周期性的，其周期为 3000 GHz。

现在假定每个滤波器的周期能够调谐 10%。对于上面给定的数值，第一个滤波器的周期能够调谐到 500 ± 25 GHz，而第二个滤波器能够调谐到 600 ± 30 GHz。注意，两个频率梳在频率 193 000 GHz 处重叠。为了得到级联结构的调谐范围概念，进行下述计算：当每个滤波器的周期调谐到下列的数值时，确定两个频率梳哪一个重叠频率最接近上述初始重叠频率，(1) 525 GHz 和 630 Ghz，(2) 475 GHz 和 630 GHz，(3) 475 GHz 和 570 GHz，(4) 525 GHz 和 570 GHz。为了了解调谐这样的结构多么复杂，同时计算为获得在 193 100 GHz 处重叠所需的每个滤波器的周期。

2.29 考虑 2.7.1 节中叙述的 Clos 开关结构。证明如果$p \geq 2m - 1$，则这一开关是严格无阻塞的。

参考文献

[AB98] M.-C. Amann and J. Buus. *Tunable Laser Diodes*. Artech House, Boston, 1998.

[AD93] G. P. Agrawal and N. K. Dutta. *Semiconductor Lasers*. Kluwer Academic Press, Boston, 1993.

[Agr95] G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd edition. Academic Press, San Diego, CA, 1995.

[AI93] M.-C. Amann and S. Illek. Tunable laser diodes utilising transverse tuning scheme. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11(7):1168–1182, July 1993.

[AKB+92] R. C. Alferness, U. Koren, L. L. Buhl, B. I. Miller, M. G. Young, T. L. Koch, G. Raybon, and C. A. Burrus. Widely tunable InGaAsP/InP laser based on a vertical coupler filter with 57-nm tuning range. *Applied Physics Letters*, 60:3209–3211, 1992.

[AY86] Y. Arakawa and A. Yariv. Quantum well lasers—gain, spectra, dynamics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 22(9):1887–1899, Sept. 1986.

[Ben65] V. E. Beneš. *Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic*. Academic Press, New York, 1965.

[Ben96] I. Bennion et al. UV-written in-fibre Bragg gratings. *Optical Quantum Electronics, 28(2):93–135, Feb. 1996.*

[BKLW00] W. F. Brinkman, T. L. Koch, D. V. Lang, and D. W. Wilt. The lasers behind the communications revolution. *Bell Labs Technical Journal*, 5(1):150–167, Jan.–Mar. 2000.

[BOS99] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. Academic Press, San Diego, CA, 1999.

[BW99] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Diffraction and Interference of Light*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

[CH00] C. J. Chang-Hasnain. Tunable VCSEL. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6):978–987, Nov./Dec. 2000.

[Che90] K.-W. Cheung. Acoustooptic tunable filters in narrowband WDM networks: System issues and network applications. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 8(6):1015–1025, Aug. 1990.

[Chi97] D. Chiaroni et al. New 10 Gb/s 3R NRZ optical regenerative interface based on semiconductor optical amplifiers for all-optical networks. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, pages 41–43, 1997. Postdeadline paper.

[CK94] R. J. Campbell and R. Kashyap. The properties and applications of photosensitive germanosilicate fibre. *International Journal of Optoelectronics*, 9(1):33–57, 1994.

[Cle94] B. Clesca et al. Gain flatness comparison between erbium-doped fluoride and silica fiber amplifiers with wavelength-multiplexed signals. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6(4):509–512, Apr. 1994.

[Clo53] C. Clos. A study of nonblocking switching networks. *Bell System Technical Journal*, 32:406–424, Mar. 1953.

[Col00] L. A. Coldren. Monolithic tunable diode lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6):988–999, Nov.–Dec. 2000.

[DEK91] C. Dragone, C. A. Edwards, and R. C. Kistler. Integrated optics $N \times N$ multiplexer on silicon. *IEEE Photonics Technology Letters*, 3:896–899, Oct. 1991.

[Des94] E. Desurvire. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*. John Wiley, New York, 1994.

[DMJ+96] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. Lykke Danielsen, and K. E. Stubkjaer. All optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):942–954, June 1996.

[Dra89] C. Dragone. Efficient $n \times n$ star couplers using Fourier optics. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 7(3):479–489, Mar. 1989.

[EM00] J. M. H. Elmirghani and H. T. Mouftah. All-optical wavelength conversion technologies and applications in DWDM networks. *IEEE Communications Magazine*, 38(3):86–92, Mar. 2000.

[FDW01] D. A. Francis, S. P. Dijaili, and J. D. Walker. A single-chip linear optical amplifier. In *OFC 2001 Technical Digest*, pages PD13/1–3, 2001.

[Flo00] F. A. Flood. L-band erbium-doped fiber amplifiers. In *OFC 2000 Technical Digest*, pages WG1-1–WG1-4, 2000.

[Fou00] J. E. Fouquet. Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid-containing planar lightwave circuit. In *OFC 2000 Technical Digest*, pages TuM1-1–TuM1-4, 2000.

[Gre93] P. E. Green. *Fiber-Optic Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[Gru95] S. G. Grubb et al. High power 1.48 μm cascaded Raman laser in germanosilicate fibers. In *Optical Amplifiers and Applications*, page 197, 1995.

[Gui98] C. Guillemot et al. Transparent optical packet switching: The European ACTS KEOPS project approach. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(12):2117–2134, Dec. 1998.

[Har00] J. S. Harris. Tunable long-wavelength vertical-cavity lasers: The engine of next generation optical networks? *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6):1145–1160, Nov.–Dec. 2000.

[ISSV96] E. Iannone, R. Sabella, L. De Stefano, and F. Valeri. All optical wavelength conversion in optical multicarrier networks. *IEEE Transactions on Communications*, 44(6):716–724, June 1996.

[Jac96] J. L. Jackel et al. Acousto-optic tunable filters (AOTFs) for multiwavelength optical cross-connects: Crosstalk considerations. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1056–1066, June 1996.

[JCC93] V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L. A. Coldren. Theory, design and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29:1824–1834, July 1993.

[JQE91] *IEEE Journal of Quantum Electronics*, June 1991.

[Kam96] I. P. Kaminow et al. A wideband all-optical WDM network. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):780–799, June 1996.

[Kas95] N. Kashima. *Passive Optical Components for Optical Fiber Transmission*. Artech House, Boston, 1995.

[Kas99] R. Kashyap. *Fibre Bragg Gratings*. Academic Press, San Diego, CA, 1999.

[KF86] M. V. Klein and T. E. Furtak. *Optics*, 2nd edition. John Wiley, New York, 1986.

[KK90] T. L. Koch and U. Koren. Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 8(3):274–293, 1990.

[KK97] I. P. Kaminow and T. L. Koch, editors. *Optical Fiber Telecommunications IIIB*. Academic Press, San Diego, CA, 1997.

[KM88] K. Kobayashi and I. Mito. Single frequency and tunable laser diodes. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 6(11):1623–1633, Nov. 1988.

[Kni76] Z. Knittl. *Optics of Thin Films*. John Wiley, New York, 1976.

[Koy06] F. Koyama. Recent advances of vcsel photonics. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 24(12):4502–4513, Dec. 2006.

[KSHS01] A. M. J. Koonen, M. K. Smit, H. Herrmann, and W. Sohler. Wavelength selective devices. In H. Venghaus and N. Grote, editors, *Devices for Optical Communication Systems*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2001.

[Lao99] H. Laor. 576 × 576 optical cross connect for single-mode fiber. In *Proceedings of Annual Multiplexed Telephony Conference*, 1999.

[Lee91] T. P. Lee. Recent advances in long-wavelength semiconductor lasers for optical fiber communication. *Proceedings of IEEE*, 79(3):253–276, Mar. 1991.

[LGT98] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, and R. W. Tkach. Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(4):525–528, Apr. 1998.

[LL84] J. P. Laude and J. M. Lerner. Wavelength division multiplexing/demultiplexing

(WDM) using diffraction gratings. *SPIE-Application, Theory and Fabrication of Periodic Structures*, 503:22–28, 1984.

[LZ89] T. P. Lee and C-N. Zah. Wavelength-tunable and single-frequency lasers for photonic communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 27(10):42–52, Oct. 1989.

[McG98] K. A. McGreer. Arrayed waveguide gratings for wavelength routing. *IEEE Communications Magazine*, 36(12):62–68, Dec. 1998.

[MS88] J. E. Midwinter and P. W. Smith, editors. *IEEE JSAC: Special Issue on Photonic Switching*, volume 6, Aug. 1988.

[MZB97] N. M. Margalit, S. Z. Zhang, and J. E. Bowers. Vertical cavity lasers for telecom applications. *IEEE Communications Magazine*, 35(5):164–170, May 1997.

[NE00] S. Namiki and Y. Emori. Recent advances in ultra-wideband Raman amplifiers. In *OFC 2000 Technical Digest*, pages FF-1–FF-2, 2000.

[NE01] S. Namiki and Y. Emori. Ultra-broadband Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(1):3–16, Jan.–Feb. 2001.

[Nei00] D. T. Neilson et al. Fully provisioned 112 × 112 micro-mechanical optical crossconnect with 35.8 Tb/s demonstrated capacity. In *OFC 2000 Technical Digest*, pages 204–206, 2000. Postdeadline paper PD-12.

[NKM98] D. Nesset, T. Kelly, and D. Marcenac. All-optical wavelength conversion using SOA nonlinearities. *IEEE Communications Magazine*, 36(12):56–61, Dec. 1998.

[NR01] A. Neukermans and R. Ramaswami. MEMS technology for optical networking applications. *IEEE Communications Magazine*, 39(1):62–69, Jan. 2001.

[O'M88] M. J. O'Mahony. Semiconductor laser amplifiers for future fiber systems. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 6(4):531–544, Apr. 1988.

[Per08] S. D. Personick. Optical detectors and receivers. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 26(9):1005–1020, May 2008.

[PS95] J. S. Patel and Y. Silberberg. Liquid crystal and grating-based multiple-wavelength cross-connect switch. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(5):514–516, May 1995.

[Rig95] P.-J. Rigole et al. 114-nm wavelength tuning range of a vertical grating assisted codirectional coupler laser with a super structure grating distributed Bragg reflector. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(7):697–699, July 1995.

[RWv93] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. van Duzer. *Fields and Waves in Communication Electronics*. John Wiley, New York, 1993.

[Ryf01] R. Ryf et al. 1296-port MEMS transparent optical crossconnect with 2.07 Petabit/s switch capacity. In *OFC 2001 Technical Digest*, 2001. Postdeadline paper PD28.

[SB87] R. A. Spanke and V. E. Beneš. An *n*-stage planar optical permutation network. *Applied Optics*, 26, Apr. 1987.

[SBJC90] D. A. Smith, J. E. Baran, J. J. Johnson, and K.-W. Cheung. Integrated-optic acoustically-tunable filters for WDM networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 8(6):1151–1159, Aug. 1990.

[SI08] Y. Suematsu and K. Iga. Semiconductor lasers in photonics. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 26(9):1132–1144, May 2008.

[SIA92] Y. Suematsu, K. Iga, and S. Arai. Advanced semiconductor lasers. *Proceedings of IEEE*, 80:383–397, 1992.

[SMB00] D. T. Schaafsma, E. Miles, and E. M. Bradley. Comparison of conventional and gain-clamped semiconductor optical amplifiers for wavelength-division-multiplexed transmission systems. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 18(7):922–925, July 2000.

[Son95] G. H. Song. Toward the ideal codirectional Bragg filter with an acousto-optic-filter design. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 13(3):470–480, Mar. 1995.

[Soo92] J. B. D. Soole et al. Wavelength selectable laser emission from a multistripe array grating integrated cavity laser. *Applied Physics Letters*, 61:2750–2752, 1992.

[Spa87] R. A. Spanke. Architectures for guided-wave optical space switching systems. *IEEE Communications Magazine*, 25(5):42–48, May 1987.

[SS96] M. A. Scobey and D. E. Spock. Passive DWDM components using microplasma optical interference filters. In *OFC'96 Technical Digest*, pages 242–243, San Jose, February 1996.

[Stu00] K. E. Stubkjaer. Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6):1428–1435, Nov.–Dec. 2000.

[Tie95] L. F. Tiemeijer et al. Reduced intermodulation distortion in 1300 nm gain-clamped MQW laser amplifiers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(3):284–286, Mar. 1995.

[Toh93] Y. Tohmori et al. Over 100 nm wavelength tuning in superstructure grating (SSG) DBR lasers. *Electronics Letters*, 29:352–354, 1993.

[Tom08] W. Tomlinson. Evolution of passive optical component technologies for fiber-optic communication systems. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 26(9):1046–1063, May 2008.

[TOT96] H. Takahashi, K. Oda, and H. Toba. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on $n \times n$ optical interconnection. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1097–1105, June 1996.

[TOTI95] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, and Y. Inoue. Transmission characteristics of arrayed $n \times n$ wavelength multiplexer. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 13(3):447–455, Mar. 1995.

[TSN94] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi. Wavelength multiplexer based on SiO_2–Ta_2O_5 arrayed-waveguide grating. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 12(6):989–995, June 1994.

[Vak99] D. Vakhshoori et al. 2 mW CW singlemode operation of a tunable 1550 nm vertical cavity surface emitting laser. *Electronics Letters*, 35(11):900–901, May 1999.

[Ven96a] A. M. Vengsarkar et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Optics Letters*, 21(5):336–338, 1996.

[Ven96b] A. M. Vengsarkar et al. Long-period gratings as band-rejection filters. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 14(1):58–64, Jan. 1996.

[VS91] A. R. Vellekoop and M. K. Smit. Four-channel integrated-optic wavelength demultiplexer with weak polarization dependence. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 9:310–314, 1991.

[WL96] K.-Y. Wu and J.-Y. Liu. Liquid-crystal space and wavelength routing switches. In

Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, pages 28–29, 1996.

[WMB92] J. Willems, G. Morthier, and R. Baets. Novel widely tunable integrated optical filter with high spectral selectivity. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, pages 413–416, 1992.

[Woo00] E. L. Wooten et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communication systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(1):69–82, Jan.–Feb. 2000.

[WSF06] M. C. Wu, O. Solgaard, and J. E. Ford. Optical mems for lightwave communication. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 24(12):4433–4454, Dec. 2006.

[Yar65] A. Yariv. Internal modulation in multimode laser oscillators. *Journal of Applied Physics*, 36:388, 1965.

[Yar89] A. Yariv. *Quantum Electronics,* 3rd edition. John Wiley, New York, 1989.

[Yar97] A. Yariv. *Optical Electronics in Modern Communications.* Oxford University Press, 1997.

[Yoo96] S. J. B. Yoo. Wavelength conversion techniques for WDM network applications. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):955–966, June 1996.

[You95] M. G. Young et al. Six-channel WDM transmitter module with ultra-low chirp and stable λ selection. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, pages 1019–1022, 1995.

[Zah92] C. E. Zah et al. Monolithic integration of multiwavelength compressive strained multiquantum-well distributed-feedback laser array with star coupler and optical amplifiers. *Electronics Letters*, 28:2361–2362, 1992.

[Zir96] M. Zirngibl et al. An 18-channel multifrequency laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8:870–872, 1996.

[ZJ94] M. Zirngibl and C. H. Joyner. A 12-frequency WDM laser source based on a transmissive waveguide grating router. *Electronics Letters*, 30:700–701, 1994.

第3章　光层中的客户层

本章介绍几种使用光纤作为基本传输机制的网络。能够认为这些网络是光层中的客户层。正如在第1章中看到的，光层为客户层提供光路径，其中光路径是客户层网元之间的物理链路。研究的所有客户层都是在电域处理数据，完成诸如固定时分复用或者统计时分复用(分组交换)等功能。它们将各种低速的声音、数据和专用线业务聚集并送入网络中。每一个这样的客户网络在其管理范围内都是重要的，并且能够在点到点的光纤链路上运行，或者工作于更成熟的光层，使用光层提供的光路径。

当今骨干网中占支配地位的客户层是SONET/SDH、以太网和光传送网(OTN)。这些协议相应于开放的系统互连(OSI)体制中的物理层(如图1.6所示)。SONET/SDH作为第一代光网络的组成部分最早在骨干网中被采用，并且成功地运作了许多年。它特别适合于支持恒定比特率(CBR)的连接，并且应用时分复用技术将这些连接信号复用到更高速率的光连接。最初为低速声音和CBR连接而设计的客户层最高速率为51 Mb/s，现在它支持数据网、分组流量，其链路传输速率达每秒几十吉比特。SONET/SDH的一个重要的性质是它可提供高可靠性的载波分级业务。

由于数据链路层协议，SONET/SDH能够传送数据网的分组，这些协议使得分组流量适合于它的连接。通用成帧规程(GFP)是一个自适应方法，它能够工作于各种数据网，包括IP网、以太网和光纤信道。

OTN网是基于SONET/SDH的概念构建的，已经将它设计成可以携带所有形式的数据流量，包括SONET/SDH流量。它已被增强，以便工作于很高的传输速率，并且具有一系列完全的和灵活的运行和管理特性。

以太网作为局域网(LAN)开始时使用同轴电缆。今天，它支持所有实际的通信媒质，包括双绞线、无线和光缆。它提供了很大范围的数据率:10 Mb/s、100 Mb/s、1 Gb/s和10 Gb/s。以太网跨越了数据链路层和物理层。

IP网也将被涉及，即使它不是一个合适的光层的客户层。它处在网络层，并且不直接在光路径上运行。然而，它是许多应用中占优势的分组传送技术，包括互联网中的应用，并且光网络携带的大部分流量是IP业务量。因此，了解IP网是重要的，因为光网络应该有效地支持它的业务量。此外，IP协议中的某些思想已经被应用来设计光网络。

IP网采用无连接路由，其仅仅依据分组的宿地址转发分组。多协议标记交换(multiprotocol label switching, MPLS)的采用增强了IP网，这一协议是一个面向连接的路由机制。在面向连接的路由中，分组流被组成大的业务流，并且对每个大业务流选择路由。大业务流用标记识别，这些标记由分组携带，以识别它们的流，并使得分组容易沿路由转发。

在城域网中有几种类型的客户层，如千兆以太网、十千兆以太网、光纤信道、弹性分组环(resilient packet ring, RPR)及SONET/SDH。存储区域网络(SAN)中，光纤信道用以互连计算机及其外围设备。RPR处在数据链路层，它不是光层特有的客户层。然而，对于数据分组业务，它成为SONET/SDH以外的另一种选择，并且类似于SONET/SDH，它采用环形网络拓扑，以提供业务的高度可用性。

在本章将介绍这些不同的网络，着重于对它们进行定性的理解，以及在光层中一些很重要的特点。首先，描述 SONET/SDH 的一些详细内容，包括 SONET 子层、帧结构及各个开销字节。在第5章和第6章中将看到，光层中的许多功能有些类似于 SONET 层的功能。特别地，SONET/SDH 网中的控制、管理和生存性是光层中上述功能如何实现的基础。类似地,在 IP 和 MPLS 方面，讨论了 IP 和 MPLS 的路由和信令协议。这些协议被再次用来控制光层。

3.1 SONET/SDH

同步光网络(synchronous optical network, SONET)是当前北美数据通信基础设施中高速信号传输和复用的标准。一项密切相关的标准，即同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)已经在欧洲和日本及大多数海底链路中被采用。

为了理解 SONET 和 SDH 的演变和标准化所依赖的各个因素，需要回顾和理解公共网中如何复用数据。在 SONET 和 SDH 之前所采用的基础设施基于准同步数字体系(plesiochronous digital hierarchy, PDH)，直到20世纪60年代中期都是如此。(北美的运营商称 PDH 为异步数字体系。)在那个时期，主要关注的焦点是复用数字语音电路。带有4 kHz 带宽的一个模拟语音电路能够以8 kHz 速率取样，并且每个样本被量化为8比特。这样得到了64 kb/s 比特率的数字语音电路。后来该比特率就被广泛地接受为数字语音电路的标准。更高速度的数据流被定义为这个基本64 kb/s 的数据流的倍数。对于这些高速信息流，在世界的不同地区出现了不同系列的标准，见表3.1。在北美64 kb/s 的信号称为 DS0，1.544 Mb/s 信号被称为 DS1，44.736 Mb/s 被称为 DS3，等等。在欧洲，该体系被标记为 E0、E1、E2、E3 等，其中 E0 的速率与 DS0 速率相同。当今，这些速率广泛用于运营商网络中，并且被电信公司用于给客户提供专用线业务，往往不是提供数据而是提供语音业务。

表3.1　异步和准同步信号的传输速率，择自文献[SS96]

级别(数据群次)	北　美	欧　洲	日　本
0	0.064 Mb/s	0.064 Mb/s	0.064 Mb/s
1	1.544 Mb/s	2.048 Mb/s	1.544 Mb/s
2	6.312 Mb/s	8.448 Mb/s	6.312 Mb/s
3	44.736 Mb/s	34.368 Mb/s	32.064 Mb/s
4	139.264 Mb/s	139.264 Mb/s	97.728 Mb/s

PDH 存在几个严重问题，导致运营公司和销售商在20世纪80年代后期都在寻求新的传输和复用标准。这就导致了 SONET/SDH 标准的出现，它解决了与 PDH 有关的许多问题。下面将解释 SONET/SDH 标准的一些优点，并与 PDH 进行比较。

1. **复用简单**:在异步复用中，网络中的每一个终端都有自己的时钟，并且在能够规定信号的标称时钟速率时，可能在不同时钟之间的实际速率存在明显差别。例如，在 DS3 信号中，不同时钟之间时钟速率变化达20 ppm[parts per million(百万分之一)]，这并不少见，可以在两个信号之间产生1.8 kb/s 比特率差。所以，当在较低速率信息流之间进行比特间插复用时，复用信息流中可能需要填充额外的比特，以解决各个信息流由于时钟速率不同而产生的差别。结果是，在异步体系中的比特率不是基本的64 kb/s

速率的整数倍，而是略微高一点。例如，一个 DS1 的信号被设计成携带 24 个 64 kb/s 信号，而它的比特率(1.544 Mb/s)略高于 24 × 64 kb/s。

用异步复用技术，很难从高速信息流中提取低比特率的信息流，例如，很难从较高速率的 DS3 中提取 64 kb/s 的信息流，不能完全将较高速率信息流解复用到它的各个分量信息流。这就导致每次提取低比特率信息流时需要"复用器山"或者堆叠起来多路复用器，如图 3.1 所示。这是相当昂贵的方案，并且也损害网络的可靠性，因为整个方案需要大量的电子电路。

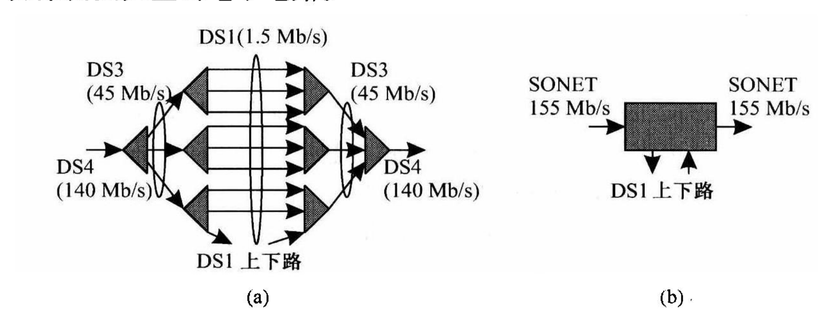


图 3.1 异步和同步复用的比较。(a) 在异步情况下，必须将多个解复用器堆积在一起，以便从复用的信息流中提取较低速率的信息流；(b)在同步情况下，能够使用相当简单的电路在单一步骤中做到这一点

SONET/SDH 的同步复用结构大大降低了复用和解复用的成本。在网络中的所有时钟都完全同步到单一的主时钟，结果在 SONET/SDH 中确定的速率是基本速率的整数倍，并且在将各个信息流复用在一起时不需要比特填充。结果是，只要确定相应比特在复用信号中的适当位置，就能从复用的 SONET/SDH 信息流中一步提取出低速信号。这就使得设计 SONET 复用器和解复用器比相应的异步方案容易得多。这一问题将在 3.1.1 节中更详细地探讨。

2. **管理：**SONET 和 SDH 标准加入了广泛的管理信息，用于管理网络，包括广泛的信息监控、连接和流量类型的识别、故障的识别和报告，以及在节点之间传送管理信息的一个数据通信信道。这是 PDH 标准最缺乏的。
3. **互操作性：**虽然 PDH 定义了复用方法，但它没有定义传输链路上的标准格式。因此，不同的供应商使用不同的线路编码、光接口等，以优化其产品，这就使得很难通过传输链路将一个供应商的设备连接到另一个供应商的设备。SONET 和 SDH 定义了标准光接口，使得链路上的不同供应商的设备之间能够具有互操作性，从而避免了这一问题。
4. **网络的有效性：**SONET 和 SDH 标准已经加入了特定的网络拓扑和特定的保护技术及相关联的协议，可以提供高有效性业务。因而，用 SONET 和 SDH 标准，在一次故障以后的业务恢复时间比 PDH 网络小得多，可以小于 60 ms，而典型情况下，PDH 网则要花费几秒到几分钟。

3.1.1 复用技术

SONET 和 SDH 应用一种先进的复用方案，而且它能够容易地在当今的超大规模集成(VLSI)电路上实现。虽然 SONET 和 SDH 基本上是类似的，但是 SONET 和 SDH 中使用的术

语是不同的，在下面的内容中将采用 SONET 版本，并且在适当的地方介绍 SDH 版本。

对于 SONET，基本的信号速率是 51.84 Mb/s，称为同步传送信号级-1(STS-1)。由 N 个按帧排列的 STS-1 信号进行字节间插而获得较高速率的信号(STS-N)。因为各个信号的时钟是同步的，不需要填充额外的比特。由于同样的原因，一条低速信息流能够容易地从复用信息流中提取出来，不需要将整个信号解复用。

当前定义的 SONET 和 SDH 速率见表 3.2。注意，STS 信号是一个电信号，在许多情况下(特别是在较高速率时)可能仅仅存在于 SONET 设备中。与其他设备的接口通常是光学的，实质上是光学形式的 STS 信号的扰频版本。使用扰频技术是为了防止在数据流中出现长串的连 0 比特或连 1 比特。每个 SONET 发射机在信号发送进光纤之前对信号扰频，接着，SONET 接收机对信号解扰频。相应于 STS-3 速率的光接口称为 OC-3，类似的光接口已经被定义为 OC-12、OC-48、OC-192 和 OC-768，它们相应于 STS-12、STS-48、STS-192 和 STS-768 信号。

SDH 的基本速率是 155 Mb/s，被称为 STM-1。注意，这一速率比 SONET 的基本比特率高。选择 SONET 比特率，使其可以容纳通常使用的异步信号，即 DS1 和 DS3 信号。选择 SDH 比特率，使其可以容纳通常使用的 PDH 信号，即 E1、E3 和 E4 信号。确定的较高比特率信号与 SONET 类似，见表 3.2。

表 3.2　SONET/SDH 的传输速率。择自文献[SS96]

SONET 信号	SDH 信号	比特率/(Mb/s)
STS-1		51.84
STS-3	STM-1	155.52
STS-12	STM-4	622.08
STS-24		1244.16
STS-48	STM-16	2488.32
STS-192	STM-64	9953.28
STS-768	STM-256	39 814.32

SONET 帧包括开销字节和净荷字节，前者称为传送开销。在称为同步净荷包(SPE)中携带着净荷数据。SPE 包括一系列附加的路径开销字节，它们在源节点插入，并且和数据一起保留，直到它到达其宿节点。例如，这些字节之一是路径踪迹，它识别 SPE 并且用来验证网络的连通性。帧结构将在 3.1.4 节中更详细地研究。

SONET 和 SDH 广泛应用指针，以指示复用的净荷数据在帧中的位置。在帧中，SPE 没有固定的起始点。作为替代，用线路开销中的一个指针指示它的起始点。甚至在 SONET 中的时钟都来自单个的源，在不同的信号之间可能存在小的频率瞬时变化。在输入信号与用来产生输出信号的本地时钟之间的这种差别，转换成两个信号之间积累的相位差。这一问题容易解决，只要允许净荷或早或迟在帧中漂移，并改变相关的指针，以标记这一漂移。这就避免了比特填充或附加缓存的需要。然而，确实需要相当数量的指针处理，这在当今的集成电路中是不难完成的。

低于 STS-1 速率的那些较低速率的、非 SONET 的数据流被映射到虚拟支线(virtual tributaries, VT)。每个虚拟支线(VT)被设计成具有足够的带宽去携带它的净荷。在 SONET 中，虚拟支线已经被定义成四种容量：VT1.5、VT2、VT3 和 VT6。这些虚拟支线被设计成携带 1.5 Mb/s、2 Mb/s、3 Mb/s 和 6 Mb/s 异步或准同步数据流，如图 3.2 所示。其中 VT1.5 信

号是最普通的，因为它保存了流行的 DS1 异步信号。在这一体系的下一级，一个虚拟支线群可以包含 4 个 VT1.5，或者 3 个 VT2，或者 2 个 VT3，或者 1 个 VT6。7 个这样的 VT 群和一系列路径开销一起进行字节间插，以建立一个基本的 SONET SPE。正如一个 SPE 在 SONET 帧内浮动那样，VT 净荷(称为 VT SPE)也能够在 STS-1 SPE 内浮动，一个 VT 指针被用来指向 VT SPE。指针位于每个 VT 群内的两个指定的字节中。图 3.3 表示了这种指针结构。

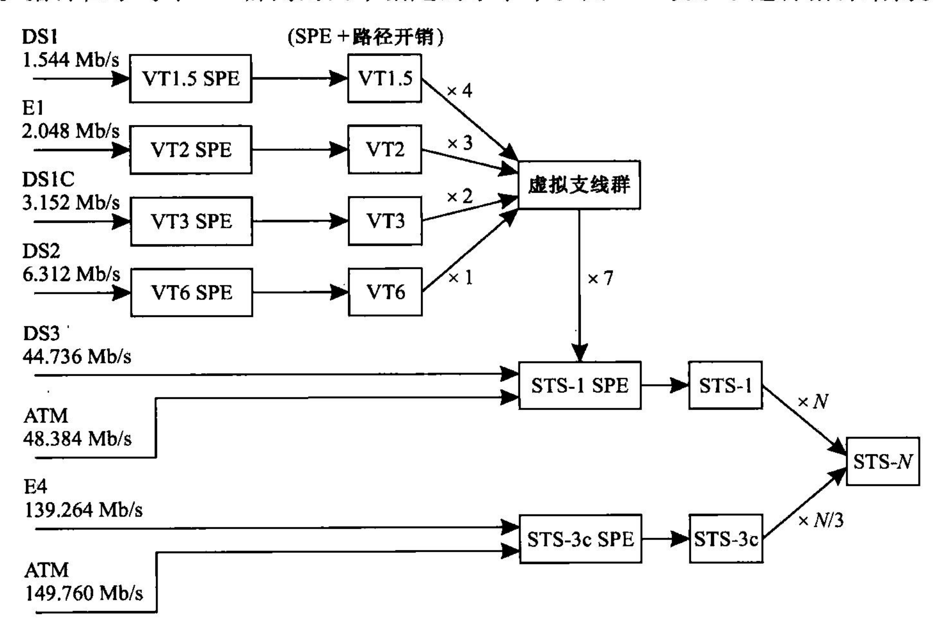


图 3.2 低速异步数据流映射到 SONET 的虚拟支线中

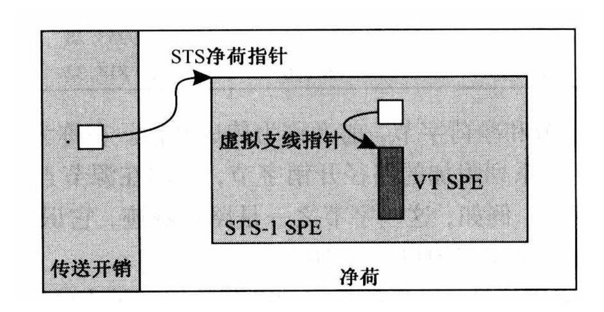


图 3.3 携带虚拟支线(VT)的 SONET STS-1 信号中的指针应用。在传送开销中的 STS 净荷指针指向STS-1同步净荷包(SPE)，并且在STS-1 SPE中的VT指针指向VT SPE

在许多情况下，必须将高速非 SONET 信号映射到一个 SPE 中，以便在 SONET 中传送。今天，最普通的例子或许是高速 IP 或者以太网分组数据流。为了这一目的，也在标准中定义一个带有锁定净荷的 STS-*N*c 信号。符号“c”代表串联，*N* 是 STS-1 净荷的数量。串联或锁定净荷意味着这一信号不能解复用到较低速率的数据流。

例如，一个 150 Mb/s 的客户信号能够被映射到 STS-3c 的信号中。已经在标准中定义了各种信号，包括 IP 信号的映射。

SDH 应用了与 SONET 相同的体系，在术语上及在低于 STM-1 信号的复用结构上有些不同。类似于 SONET 的虚拟支线，SDH 使用了虚容器(virtual containers，VC)，以容纳较低速

率的非SDH信号。VC已经定义了5种容量:VC-11、VC-12、VC-2、VC-3和VC-4。这些虚容器被指定分别携带1.5 Mb/s(DS1)、2 Mb/s(E1)、6 Mb/s(E2)、45 Mb/s(E3和DS3)及140 Mb/s(E4)的异步或准同步数据流。然而，这里定义了两级体系，其中VC-11、VC-12和VC-2能够复用到VC-3或VC-4，然后VC-3和VC-4复用成STM-1信号。

3.1.2　虚串联(VCAT)和链路容量调节方案(LCAS)

正如先前讨论过的那样，SONET选择锁定或串联多个STS-1净荷，用以携带客户信号。一般被支持的串联静荷是STS-3c、STS-12c、STS-48c和STS-192c，与它们相应的线速率在表3.2中给出。串联的缺点是所组成的净荷必须是邻近的。因此，如果两个STS-1是相邻的，但是第三个STS-1是不相邻的，则这三个STS-1不能串联构成STS-3c。这就可能留下了难以处理的未用的带宽。另一个缺点是既然有一个有限数目的串联连接速率，STS-3c、STS-12c…，就可能在客户信号速率与可用的SONET/SDH连接速率之间失配。例如，能够携带一个吉比特以太网链路的最小SONET串联连接是一个2.5 Gb/s STS-48c的连接，它超过了需要的150%。还有一个缺点是较旧的SONET DCS设备以STS-1速率交换，不能交换较大的净荷。在这种情况下，实现邻近的串联业务需要升级中间的SONET交换设备，这可能是昂贵的。

虚串联(VCAT)允许非邻近净荷联合组成一个连接，这样就解决了这些问题。这样的组合称为虚串联组(virtual concatenation group，VCG)。VCAT是一个逆复用技术，它将多个连接联合组成到汇聚带宽上的单一连接。例如，STS-1-12v是一个SONET VCAT连接，其数据率与STS-12c一样，包含了12个STS-1净荷，这些净荷可能是非相邻的。其中，在STS-1-12v中的"v"意味着虚串联。具有同样数据率的另一个SONET VCAT连接是一个STS-3c-4v，它包含4个STS-3c连接。

对于SONET的VCAT的标记法是STS-*N*-*M*v，其中*N*是基本速率的大小，*M*是在VCG中基本速率的数目。*N*的值是标准串联的净荷大小，一般来说，是STS-1和STS-3c。*M*的值比相邻串联的限制更少，结果是对于数据通信应用能够提供正确大小的带宽。回到吉比特以太网的应用，VCAT能够提供1.05 Gb/s STS-3-7v的连接，它仅增加了5%的额外容量。SDH也有虚串联。SDH的VCAT符号是VC-*N*-*M*v，例如，VC-4-7v包含了7个VC-4的连接，VC-3-5v包含了5个VC-3的连接。

注意，对于一个SONET STS-1-*M*v连接，中间的SONET节点可能不知道一个特定的STS-1是VCG的一个基本速率成分。这是虚串联的一个重要的特性，因为它允许在大量的SONET安装场地范围内无缝部署，只有终端节点感知到VCAT，这也成为采用的主要因素之一。当然，SDH也是这样。

一个VCG可以包含低阶支路(例如，VT-1.5/VC-11或者VC-12)或者高阶支路(例如，VC-3/STS-1或者VC-4/STS-3c)。据此，有低阶VCAT(简写为LO-VCAT)和高阶VCAT(简写为HO-VCAT)。典型地，10 Mb/s和100 Mb/s以太网业务用LO-VCAT，而吉比特以太网业务用HO-VCAT。例如，SONET VT1.5-64v能够携带100 Mb/s以太网业务，而STS-1-21v能够携带1 Gb/s以太网业务，对于这两种情况，该方案仅需增加2%的预留容量。

VCAT也允许VCG中的各个基本速率成分被路由到不同的物理路径。因此，一个VCAT连接能够由网络的不同路径的连接构成，它能够进一步降低其中难处理的未用带宽。

联合VCG中路由到不同物理路径上的基本速率成分引起了一个实际问题，因为路径的

延迟可能非常不同。延迟中的差异被称为微分延迟。为了恰当地联合这些字节流量，在连接的终端需要用缓存器补偿延迟。标准规定允许 VCG 的任意两个基本速率成分之间的微分延迟高达 128 ms。这一数值相当于在全球任意两点之间路由时能够预期的最大延迟！实际设备能够容忍的微分延迟是 32 ~ 64 ms。

链路容量调节方案(LCAS)是一个伴随 VCAT 的软件，它允许在增加或移去 VCG 的基本速率成分时无缝调整 VCAT 连接带宽的大小。例如，在采用这一连接作为一个 IP 链路时，这一软件在管理一个 VCAT 连接的容量时是有用的。因此，链路容量能够被调节，以改变 IP 业务负载。当业务必须重路由以使带宽应用最佳化或者避开将经受维护的网络部件时，LCAS 也能够用来实现业务无缝再梳理。

3.1.3 SONET/SDH 层

SONET 层包括四个子层——路径层、线路层、段层和物理层。图 3.4 表示了上面三层。除物理层外，每一层都有一系列相关的开销字节，它们用于几种目的。在某一层被引入的任何时候加入这些开销字节，而当该层在一个网络元件处终止的任何时候移去这些开销字节。当在下一节讨论与每一层相联系的帧结构和开销时，这些层的功能将变得更清楚。

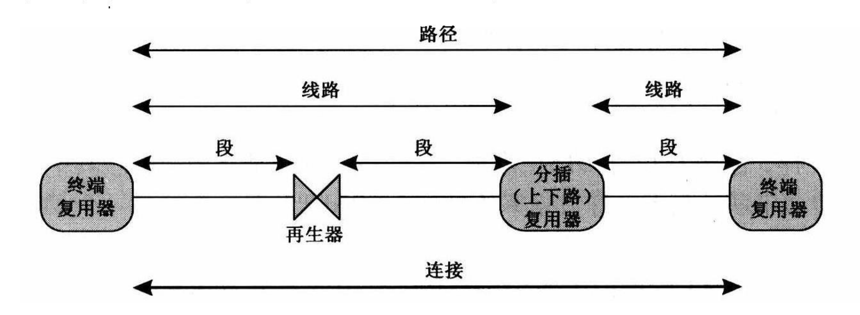


图 3.4 图示了各个 SONET/SDH 层，其中显示了通过终端复用器(TM)和分插复用器(ADM)的一个连接样本的路径层、线路层和段层的终端。图中没有显示物理层

在 SONET(和 SDH)中的路径层负责节点之间的端到端的连接，它只能终止在 SONET 连接的终点。中间节点可以进行路径层信号的性能监测，但是路径开销本身在连接的源节点被插入，在宿节点被终止。

每个连接经过网络中一系列链路和中间节点。线路层[在 SDH 中称为复用段(multiplex section)层]将许多路径层的连接复用到两个节点之间的单条链路。因此，线路层沿着 SONET 连接的路由，终止在每个中间线路终端复用器(TM)或分插复用器(ADM)。在线路失效事件中，线路层也负责完成某种形式的保护倒换，以恢复业务。

每一链路包括许多段，相应于中继器之间的一截链路。段层[在 SDH 中称为再生段(regenerator-section)层]终止在网络的每个中继器处。

最后，物理层负责光纤中比特的实际传输。

3.1.4 SONET 帧结构

图 3.5 表示了 STS-1 帧的结构。一帧的持续时间是 125 μs(它相当于 8000 帧/s 的速率)，与 SONET 信号的速率无关。这一时间是用语音电路的 8 kHz 取样速率设定的。该帧是一个 810 字节的特定序列，包括分配给携带开销信息的字节和携带净荷的其他字节。能够将这个

帧形象化成包含9行和90列，其中每个元持有一个8比特的字节。这些字节从左到右一行一行地发送，而每个字节中最重要的比特首先被发送。

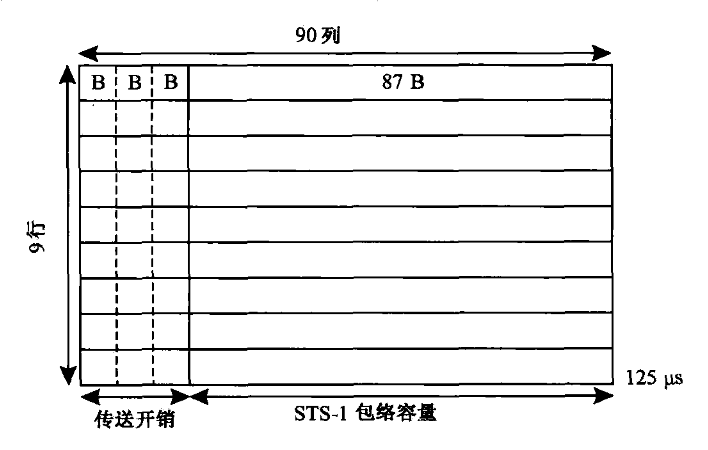


图3.5 一个STS-1的帧结构。B表示8比特的字节

头三行是预定用做段和线路开销的字节。其余的字节携带STS-1的同步净荷包(SPE)。STS-1 SPE本身包含一列开销字节，用于携带路径开销。

一个STS-N帧用N个STS-1帧比特间插获得，如图3.6所示。传送开销在头3N列，其余的87N列容纳净荷。传送开销在间插之前需要与帧定位。然而，由于每个STS-1有一个联系净荷的指针，用以指示其SPE的位置，因此净荷不必帧定位。一个STS-Nc帧看起来像一个STS-N帧，只是在SONET层净荷不能分割成低速信号。同样的87N列容纳净荷，在STS-净荷指针的特定值被用来指示净荷是串联的。

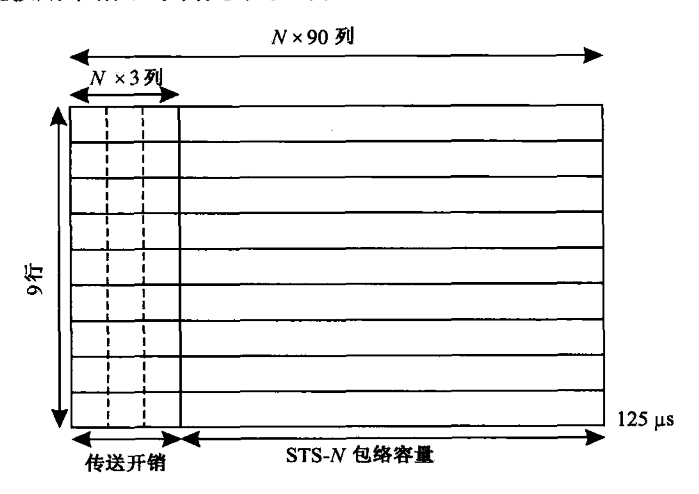


图3.6 STS-N帧结构，它是由N个STS-1帧比特间插得到的

图3.7表示了STS-1帧或STS-Nc帧中的开销字节。在一个STS-N帧中，有N个系列的开销字节，每个STS-1有一个系列。每个STS-1有它自己的段和线路开销系列。另一方面，一个STS-Nc仅有单个系列的开销字节，因为它的净荷必须通过SONET网完整地从它的源节点携带到它的宿节点。

现在详细叙述开销字节，因为它们提供了关键的管理功能，使得SONET对于网络工作者

具有如此大的吸引力。在下面的讨论中，字节的实际位置和格式不如理解它们完成的功能那样重要。在后面第 5 章关于光层的内容中，还要详细考虑这些功能。特别是段和线路开销对光层非常重要。如果不是所有的字节被监测，则其中一些字节会被光层设备监测。此外，当前还有一些开销字节未定义，这些字节现在可能被考虑用于携带光层开销信息。在第 5 章中将更详细地讨论这方面的内容。为了更详细了解这些开销字节的描述，请见文献[Tel99]。

				路径开销
段开销	组帧 A1	组帧 A2	踪迹/增长 J0/Z0	踪迹 J1
段开销	BIP-8 B1/未定义	联络线 E1/未定义	用户 F1/未定义	BIP-8 B3
段开销	数据通信 D1/未定义	数据通信 D2/未定义	数据通信 D3/未定义	信号标签 C2
线路开销	指针 H1	指针 H2	指针 H3	路径状况 G1
线路开销	BIP-8 B2	数据通信 D5/未定义	数据通信 D6/未定义	用户信道 F2
线路开销	数据通信 D4/未定义	自动保护倒换 K1/未定义	自动保护倒换 K2/未定义	指示器 H4
线路开销	数据通信 D7/未定义	数据通信 D8/未定义	数据通信 D9/未定义	增长 Z3
线路开销	数据通信 D10未定义	数据通信 D11未定义	数据通信 D12/未定义	增长 Z4
线路开销	同步状况/增长 S1/Z1	REI-L/增长 M0或M1/Z2	联络线 E2/未定义	串联式连接 Z5

图 3.7 SONET 开销字节。形式 X/Y 的条目表示第一个标签 X 用于 STS-*N* 信号中的第一个STS-1，而第二个标签Y用于STS-*N*信号中的其余STS-1

段开销

组帧(A1/A2)。这两个字节被用来描述帧结构，并被设定为 STS-*N* 内每个 STS-1 中的预定值。网元用这些字节确定一个新的帧的起点。

段踪迹(J0)/段扩展(Z0)。J0 字节存在于一个 STS-*N* 中的第一个 STS-1 中，并用做携带一个识别器，它能够被监测，以验证网络中相邻的段终止节点之间的连接。Z0 字节存在于其余的 STS-1 中，它的应用仍需要确定。

段 BIP-8 (段比特间插奇偶性，B1)。这一字节处在 STS-*N* 中的第一个 STS-1 中，并且被用来监测每一段的误比特性能。当前，这个字节在 STS-*N* 中其余帧中的位置还未定义。发射机计算扰码后前一个 STS-*N* 帧中所有字节内计算的比特间插奇偶性，并将其放在扰码前当前帧的 B1 字节中。一个奇数的奇偶校验值表示一个错误。

联络线(E1)。这个字节(处在帧的第一个 STS-1 中)被用来携带节点之间的语音信道，供现场维护人员使用。

段用户信道(F1)。供用户插入附加的用户专用信息，它处于帧的第一个 STS-1 中。

段数据通信信道(D1、D2、D3)。这些字节(处在帧的第一个 STS-1 中)被用来携带数据通信信道(DCC)，以供维护的目的，如告警、监测和控制。

线路开销

下面是一些线路开销字节功能的简要概述。

STS 净荷指针(H1 和 H2)。在线路开销中的 H1 和 H2 字节携带一个两字节的指针，它指定 STS SPE 的位置。更确切地说，这些字节携带了相应于指针和 STS SPE 的第一个字节之间偏离量的值。

线路 BIP-8（线路比特间插奇偶性,B2)。B2 字节携带一个比特间插奇偶校验值，用于 STS-*N* 中的每一个 STS-1。考虑线路开销中所有比特的奇偶性和扰码前的前一个 STS-1 帧的包容量，以计算这一校验值。用线路终端设备检查这一字节。中间段终端设备检查和重设段开销中的 B1 字节，但是不改变 B2 字节。

自动保护倒换(APS)信道(K1、K2)。K1 和 K2 字节用在自动保护倒换(APS)期间提供一个携带信令信息的信道。在第 6 章中将研究不同形式的 SONET APS 方案。K2 字节也被用来检测被称为前向故障指示器(forward defect indicator)的这一特定类型的信号，并携带返回故障指示器(return defect indicator)信号。在网络中，这些故障指示器信号都用于维护；在 5.5.4 节中将研究它们的应用。

线路数据通信信道。字节 D4 到 D12(位于帧的第一个 STS-1 中)都被用来携带线路数据通信信道，如告警、监测和控制等用于维护的信息。

路径开销

STS 路径踪迹(J1)。如段开销那样，路径开销包含一个字节(J1)，用以携带路径识别符，它能够被监控，用以校验网络中的连通性。

STS 路径 BIP-8(STS 路径比特间插校验,B3)。B3 字节提供路径层的误码率检测。它携带一个比特间插校验值，该值由计算在扰码前的前一个 STS SPE 所有比特位得出。

STS 路径信令标签(C2)。C2 字节被用来指示 STS SPE 的内容。分配特定的标签来表示每种类型的映射到 SONET STS-1 的信号。

路径状态(G1)。G1 字节被用来将路径性能从宿节点传送回源节点。宿节点将当前接收信号中错误数目插入这一字节，然后这一字节由源节点监测。这一字节的一部分也被用来将故障指示器信号携带回源节点。故障指示器信号的应用将在 5.5.4 节中研究。

3.1.5 SONET/SDH 物理层

依据涉及的比特率和传送距离，定义了多种用于 SONET/SDH 的物理层接口，见表 3.3。已经采用了 ITU 定标的 SDH 版本，因为它更流行。为 SONET 系统定义的接口通常与 SDH 版本一致。一般情况下，能够依据发射机与接收机之间的链路距离和损耗对不同的应用进行分类。为此,所定义的应用就能归类于下述几种之一：

- 局内(intraoffice)连接(I)相应的距离，大约小于 2 km(用 SONET 术语，这属于短距离)；
- 短距离(short-haul)局间连接(S)相应的距离，在 1310 nm 工作波长下大约为 15 km，在 1550 nm 工作波长下大约为 40 km(用 SONET 术语，这是中等距离)；
- 长距离(long-haul)局间连接(L)相应的距离，在 1310 nm 工作波长下大约为 40 km，在 1550 nm 工作波长下大约为 80 km(用 SONET 术语，这是长距离)；

- 很长距离(very-long-haul)局间连接(V)相应的距离，在 1310 nm 工作波长下大约为 60 km,在 1550 nm 工作波长下大约为 120 km;
- 超长距离(ultra-long-haul)局间连接(U)相应的距离,大约为 160 km。

表 3.3 用于 SDH 的不同物理接口。引自 ITU 推荐的标准 G.957 和 G.691。在光纤跨距内没有使用光放大器。在应用码中的第一个字母指定了目标距离，接下来的数字表示比特率。在句点后面的数表示光纤的型号和工作波长:空格或1表示在标准单模光纤(G.652)上1310 nm波长的传输，2表示在标准单模光纤(G.652)上传输1550 nm波长，3表示在色散位移光纤(G.653)上传输1550 nm波长，5表示在非零色散位移光纤(G.655)上传输1550 nm波长。发射机包括多纵模(MLM)法布里-珀罗激光器和单纵模(SLM)DFB激光器，以及发光二极管(LED)。色散限制的两个值分别相应于发射机的两种选择。ffs表示该指标尚需进一步研究。在这种情况下,采用直接调制SLM激光器的色散限制链路，其中关于如何表征啁啾限制还没有达成协议。某些应用是损耗有限制的，因而没有采用色散限制(NA)

比特率	应用码	波长/nm	光纤	损耗/dB	发射机	色散/(ps/nm)
STM-1	I-1	1310	G.652	0~7	LED/MLM	18/25
	S-1.1	1310	G.652	0~12	MLM	96
	S-1.2	1550	G.652	0~12	MLM/SLM	296/NA
	L-1.1	1310	G.652	10~28	MLM/SLM	246/NA
	L-1.2	1550	G.652	10~28	SLM	NA
	L-1.3	1550	G.653	10~28	MLM/SLM	296/NA
STM-4	I-4	1310	G.652	0~7	LED/MLM	14/13
	S-4.1	1310	G.652	0~12	MLM	74
	S-4.2	1310	G.652	0~12	SLM	NA
	L-4.1	1310	G.652	10~24	MLM/SLM	109/NA
	L-4.2	1550	G.652	10~24	SLM	ffs
	L-4.3	1550	G.653	10~24	SLM	NA
	V-4.1	1310	G.652	22~33	SLM	200
	V-4.2	1550	G.652	22~33	SLM	2400
	V-4.3	1550	G.653	22~33	SLM	400
	U-4.2	1550	G.652	33~44	SLM	3200
	U-4.3	1550	G.653	33~44	SLM	530
STM-16	I-16	1310	G.652	0~7	MLM	12
	S-16.1	1310	G.652	0~12	SLM	NA
	S-16.2	1550	G.652	0~12	SLM	ffs
	L-16.1	1310	G.652	10~24	SLM	NA
	L-16.2	1550	G.652	10~24	SLM	1600
	L-16.3	1550	G.653	10~24	SLM	ffs
	V-16.2	1550	G.652	22~33	SLM	2400
	V-16.3	1550	G.653	22~33	SLM	400
	U-4.2	1550	G.652	33~44	SLM	3200
	U-4.3	1550	G.653	33~44	SLM	530

续表

比特率	应用码	波长/nm	光纤	损耗/dB	发射机	色散/(ps/nm)
STM-64	I-64.1r	1310	G.652	0~4	MLM	3.8
	I-64.1	1310	G.652	0~4	SLM	6.6
	I-64.2r	1550	G.652	0~7	SLM	40
	I-64.2	1550	G.652	0~7	SLM	500
	I-64.3	1550	G.653	0~7	SLM	80
	I-64.5	1550	G.655	0~7	SLM	ffs
	S-64.1	1550	G.652	6~11	SLM	70
	S-64.2	1550	G.652	3/7~11	SLM	800
	S-64.3	1550	G.653	3/7~11	SLM	130
	S-64.5	1550	G.655	3/7~11	SLM	130
	L-64.1	1310	G.652	17~22	SLM	130
	L-64.2	1550	G.652	11/16~22	SLM	1600
	L-64.3	1550	G.653	16~22	SLM	260
	L-64.3	1550	G.653	0~7	SLM	ffs
	V-64.2	1550	G.652	22~33	SLM	2400
	V-64.3	1550	G.653	22~33	SLM	400

其他变量包括所用的光纤型号和发射机型号。光纤包括标准单模光纤(G.652)、色散位移光纤(G.653)和非零色散位移光纤(G.655)。发射机型号包括用于短距离和低比特率、工作于1310 nm的LED和多纵模(MLM)法布里-珀罗激光器，以及用于较高比特率和较长距离、工作于1550 nm的单纵模(SLM)DFB激光器。物理层使用扰码技术防止数据中出现长连“1”和长连“0”。

各种应用规定了许多与传输相关的参数，其中主要的有链路上允许的损耗范围和最大色散。损耗包含路径上的连接器和熔接点的损耗。在局内连接中，后者对整个损耗的相对贡献特别高，在这种情况下，在互连中可能存在许多配线板和连接器。假定局内连接的损耗为3.5 dB/km，短跨距为0.8 dB/km，对于其他较长距离的应用，在1310 nm波长为0.5 dB/km，在1550 nm波长为0.3 dB/km，这样就能够将损耗数转换成目标距离。类似地，也能够基于有关工作范围内使用的光纤的色散参数，将色散数量转换成目标距离。

这些标准允许使用光功率放大器和光前置放大器，但是不包括光线路放大器。在使用光线路放大器情况下，看到在没有中继的情况下跨距同样大大超过了这里指出的距离限制。当前，带有光线路放大器的长距离WDM系统的中继器间距大约为400~600 km，而某些超长距离的系统将这一距离延长到几千千米。这类系统的传输距离与销售商有关，并且还没有定出标准。(注意，在有关WDM系统的上下文中，使用“长距离”和“超长距离”与SDH术语中的应用是不同的。)

3.1.6 SONET/SDH 基础设施中的工作单元

图3.8表示了在网络中应用的不同类型的SONET设备。在环形结构、线形结构和点到点链路的网络结构这三种形式中采用了SONET设备。较早的应用是点到点链路形式，至今这种拓扑仍然在许多应用中采用。在这种情况下，链路端点的节点称为终端复用器(terminal

multiplexer, TM)。有时也称 TM 为线路终端设备(line terminating equipment, LTE)。在许多情况下,必须从高速信息流中提取一个或多个低速信息流。同样地,需要将一个或多个低速信息流加到高速信息流中。这一功能是用分插复用器(add/drp multiplexer, ADM)完成的。例如,一个 OC-48 ADM 能够从 OC-48 信息流中上下路 OC-12 或 OC-3 信息流。现在 ADM 被广泛应用于 SONET 基础设施中。几个 ADM 能够插在 TM 之间的点到点链路中,形成线形结构。

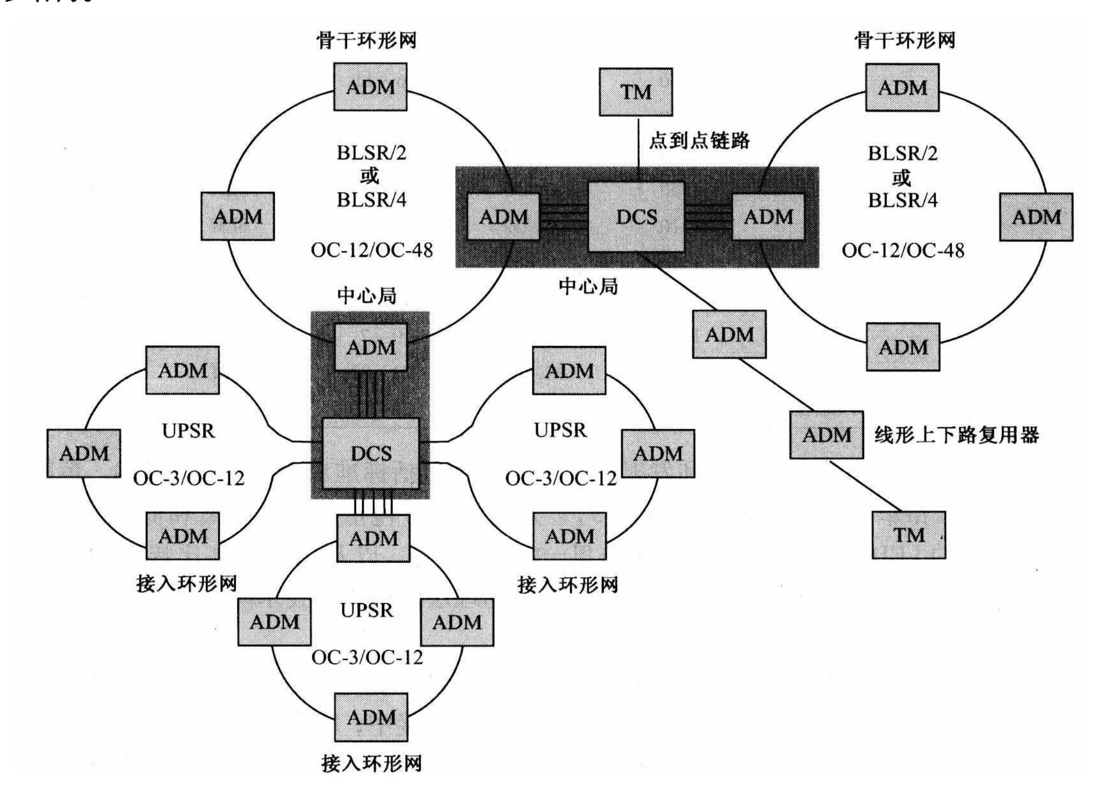


图 3.8 SONET 基础设施中的工作单元。图中示出了几种不同的 SONET 结构,包括点到点链路、线形结构中的上下路复用器和环形结构。也表示了接入环网和局间(骨干)环网。该图也解释了在SONET基础设施中DCS的作用,包括交叉连接低速信息流、互连多个环,以及它本身用做环的一个节点

存在故障时,保持业务的可用性已经成为 SONET 运用中的关键驱动力。用于这一目的的最普通的拓扑是环形拓扑。环形拓扑提供了一条备用路径,使得在链路或节点失效事件中可以重路由,而且它的拓扑结构简单。环形拓扑由多个 ADM 组成,除完成复用和解复用操作外,它还有处理故障所需的保护机制。通常,SONET 设备可以在下述三种结构下构成:环形 ADM、线形 ADM 或者作为终端复用器。

环形拓扑既用于网络的接入部分,也用在网络的骨干(局间)部分,用以连接到中心局。鉴于当今对网络容量的需求,相当普遍地使用多个重叠的环网,特别是在骨干网中,每一个环网运行在由下一层光层提供的不同波长上。

有两种形式的环结构被应用:单向路径交换环(unidirectional path-switched ring, UPSR)和双向线路交换环(bidirectional line-switched ring, BLSR)。BLSR 既能够使用两芯光纤(BLSR/2),

也可以使用四芯光纤(BLSR/4)。这些结构及其所包含的保护机制将在第6章中详细讨论。一般情况下，UPSR被用在网络的接入部分，用以将多个节点连接到位于中心局的枢纽节点，而BLSR被用在网络的局间部分，用以互连多个中心局。

在SONET基础设施中，另一个主要的部件是数字交叉连接(digital crossconnect, DCS)。DCS被用来管理中心局内所有传输设备。在到达DCS之前，中心局的各个单个DS1和DS3都通过人工接插在一个接插板上。虽然对于较少数目的业务流，这样可以工作得很好，但是用这样的方法不可能管理今天的中心局，它要处理数千个这样的业务流。DCS自动处理这一过程，并且在软件控制下交叉互连这些单个的业务流，以代替接插板。它也进行性能监测，同时已经加入了复用功能。一开始，DCS从处理PDH业务流起步，但是现已经发展到同样处理SONET业务流。虽然包含DCS的整个网络拓扑是一个网状网，但请注意至今只有环形网被标准化了。

当前，各种DCS已经可以商用，如图3.9所示。典型情况下，这些DCS有着几百到几千个端口。术语梳理(grooming)是指将带有类似目的地、服务质量和业务类型的业务组合在一起。包括将低速业务流复用到高速业务流，同样也包括从不同的高速业务流中提取低速业务流，并且基于特殊的属性将它们组合在一起。在这方面，DCS完成的梳理类型直接与流量交换的粒度相关。如果DCS在DS1速率的粒度下交换流量，则它是在DS1级别梳理流量。在层次结构的底部是一个窄带DCS，它在DS0级别梳理流量。下一个是广带DCS，它在DS1速率梳理流量，然后是宽带DCS，它是在DS3/STS-1速率下梳理流量。通常，这些DCS具有从梳理速率到更高速率的接口范围。例如，广带DCS有从DS1到OC-12的接口范围，而宽带DCS有从DS到OC-768的接口范围。也有一些DCS，它们在DS3及以上速率上进行流量梳理，具有主要的高速光接口。当这样的一部分能够被称为宽带DCS时，更普遍地称它为光交叉互连(optical crossconnect)。然而，还有其他形式的光交叉互连，它们在STS-48速率上梳理流量，除此之外，还有使用纯光开关矩阵，以波长或波带为单位进行梳理的方法。

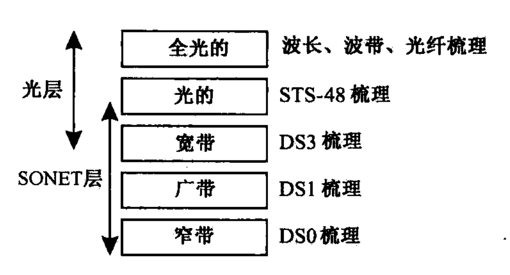


图3.9 不同形式的交叉互连系统

除了使用这种交叉互连系统的体系外，为什么不使用具有高速接口的单个DCS，它以最低所需的速率，如DS0，进行梳理？因为从可扩展性、价格和占地面积等方面的实际考虑，这是不可能的。例如，难以想象，构建具有几百到几千个10 Gb/s OC-192的端口的交叉互连设备，而在DS1级别进行梳理。一般情况下，交叉互连设备上所希望的接口速率越高，它在图3.9的梳理层次结构中的位置越高。

DCS也能够结合ADM功能，并执行其他网络功能，如对故障恢复，这是第6章的课题。

3.2 光传送网

有时按 G.709 标准采用光传送网(OTN)这一术语，它被设计成在光纤中传送数据分组业务，如 IP 和以太网业务，以及传统的业务，特别是 SONET/SDH 业务。它被称为数字包装(digital Wrapper)技术，因为它将用于运行和经营管理开销信息中的任一客户的信号进行包装。它的 OTU1、OTU2 和 OTU3 等线速率见表3.4。它是在 SONET/SDH 概念上建立的，并具有下述性能。

表 3.4 OTN 线路速率与 SONET/SDH 线路速率的比较

OTN(G.709)	线路速率	SONET/SDH	线路速率
OUT1:	2.666 Gb/s	STS-48/STM-16:	2.488 Gb/s
OUT2:	10.709 Gb/s	STS-192/STM-64:	9.953 Gb/s
OUT3:	43.018 Gb/s	STS-786/STM-128:	39.813 Gb/s

1. **前向纠错(FEC)**:OTN 已经被设计用于高速数据传输，见表 3.4。在很高数据速率和很长传输距离的情况下，噪声是非常重要的，在需要确保低误码时，它成为一个问题。前向纠错(FEC)是为达到低误比特率的重要手段。FEC 已经被用在 SDH 设备中。它们是采用未使用的段开销字节携带冗余的 FEC 字节的专门编码方案。然而，性能是受限的，因为字节数是有限的，并且不能保证与其他厂商的设备进行互操作。OTN 已经设计了携带 FEC 开销，并且使用较强的(255,239)里德 - 所罗门(Reed-Solomon)码的 FEC。这样对每个 255 字节块，有 16 个冗余字节。FEC 能够在一个块中修正多个 8 字节的错误码，并且能检测到一个 16 字节的错误码。这些块被间插,增加了能够被修正的错误突发包的长度。
2. **管理**:正如在前一节中看到的，SONET/SDH 支持在段、线路和路径级监控和管理信号。这一开销包括信号识别、BER 测量和传达告警信息。OTN 提供一种结构，用以监控点到点和覆盖不同段的连接。这些段可以在任一给定点和 6 个这样的监控段重叠。一个应用实例是网络 A 的一个连接，它通过另一个网络 B，即网络 B 用做网络 A 的载体。那么，在连接通过网络 B 时，两个网络的操作者必须使用它们自己的监控和管理信号系列去监控这一连接。这些信号必须协同地运行。
3. **协议透明度**:OTN 提供恒定比特率的业务。它具有对它的客户透明的连接运行和经营管理。它能够携带所有形式的数据包业务，包括 IP 和 10 吉比特以太网，以及 SONET/SDH 帧。OTN 帧能够携带整个 SONET/SDH 帧，包括没有修改的开销。表 3.4 表明，OTN 的线路速率比 SONET/SDH 线路速率高 7%，这是由于它附加了开销和 FEC 信息。
4. **异步定时**:OTN 具有异步映射，它将客户信号映射到 OTN 帧中，其中用于产生帧的时钟可能是一个简单的自由运行的振荡器。考虑到 OTN 帧的时钟和客户信号之间任意的失配，OTN 净荷可以在帧内浮动。使用简单的自由运行振荡器能够简化装置，并且降低成本。OTN 也具有同步映射，其中产生 OTN 帧的时钟由客户信号导出。

3.2.1 OTN体系

OTN体系的各层如图3.10所示。光传输段(OTS)层、光复用段(OMS)层和光信道(OCh)层处在光域。OTS层管理光部件之间的光纤链路段，如光放大器之间或光放大器与WDM复用器之间的光纤链路段。OMS层管理光复用器和开关之间的光纤链路，OCh层管理3R再生器之间的光连接(例如，光路径)。

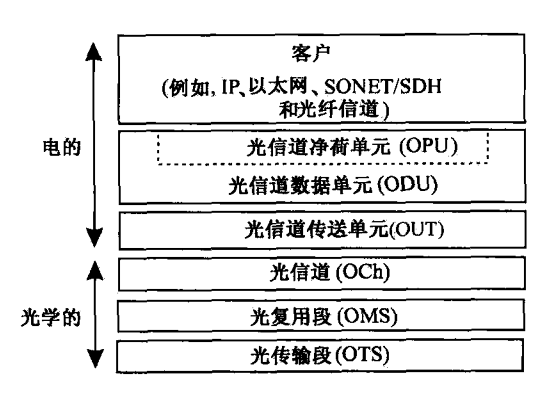


图3.10 OTN体系

光信道传送单元(OTU)和光信道数据单元(ODU)具有与SONET/SDH的段、线路、路径各层类似的功能。OUT类似于SONET/SDH中的段层，现在OTN OCh层提供了3R再生器之间的光连接。它的开销用以划定OTN帧、提供光连接的标志、监控误码率性能、携带表示信号故障的告警指示器，以及在光连接的端点之间提供通信信道。这一层将FEC加到OTN帧中，并且在发送之前对帧进行扰码。此外，它提供多帧的同步信息。多帧是在多个OTN帧内传送消息的一种方法。例如，一个256字节的消息能够通过在256个帧内的单个开销字节进行传送。多帧具有固定的周期，它必须是2的幂次。

光信道数据单元(ODU)具有和SONET/SDH中的线路层和路径层类似的功能。它支持高达6个串接连接的监控。每个监控都提供识别、监控BER性能、携带告警指示器，以及对端点提供通信信道。ODU层有光信道净荷单元(OPU)子层，它使客户信号适应OTN帧。

3.2.2 帧结构

图3.11(a)表示了OTN的帧结构。它由4行和4080列的字节组成。每帧传送顺序从第1行开始，每一行从左到右串联发送。每一行间插了16个由255字节组成的FEC块，总字节数为16×255=4080字节。每一块含有1个开销字节、238个净荷字节和16个冗余FEC字节。因为16个块是间插的，每个块能够纠正8个错误字节，对错误的突发包能够修正高达16×8=128字节。OTU和ODU开销位于OTN帧的第1列和第14列，其中OTU开销在第1行，ODU开销在第2行到第4行。OPU开销在帧的第15列和第16列。图3.11(b)介绍了OTN帧的开销字节。每帧在发送前先加扰码。

下面介绍图3.11中所示的其他开销。

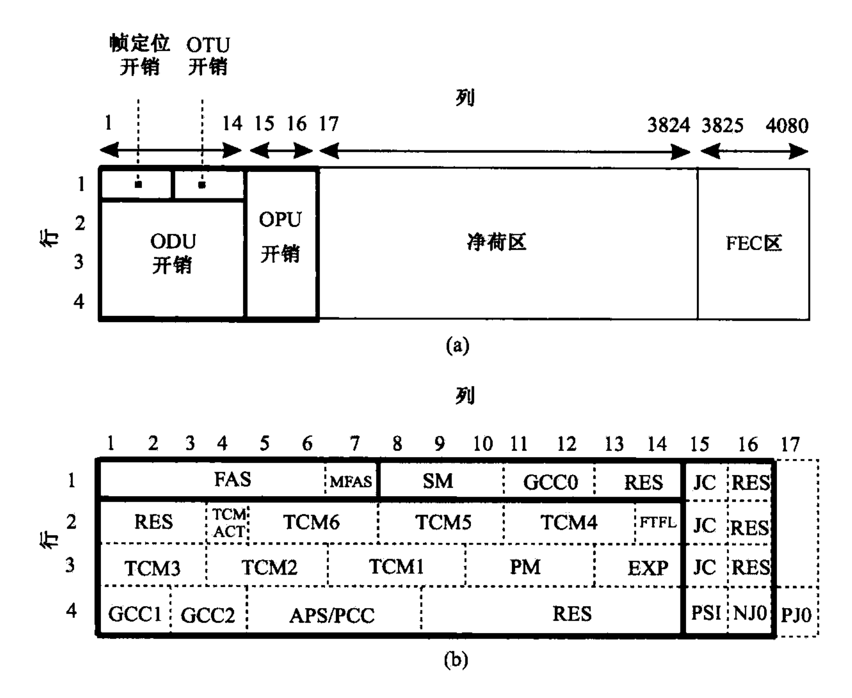


图3.11 (a)表示开销字节位置的OTN(G.709)帧结构;(b)较大的开销字节

帧定位开销

- **帧定位信号(FAS)。**这6字节被用来描述类似于SONET段开销中的A1和A2字节的帧。当帧被扰码时,该字段被排除在外。
- **多帧定位信号(MFAS)。**一些开销字段携带有分布在多个帧中的信息,简称多帧。每增加一帧则MFAS字节递增256个值,其表示多帧中含有帧的数目。MFAS字节是用来同步多帧的字节。

光信道传送单元(OTU)开销

- **段监控(SM)。**SM字段是3个字节,并有踪迹标志符、比特间插奇偶性-8(BIP-8)字节,以及告警信号。下面将具体叙述。
- **踪迹识别符(TTI)。**TTI字节携带光连接两个端点的识别符。TTI与SONET/SDH的段踪迹字节(J0)有类似的功能。

  每个端点具有16字节的识别信息。通过带有64帧周期的多帧内的TTI字节携带这些信息。前32个字节携带两端点的识别信息,其余32字节由运营商指定。
- **BIP-8。**它与SONET/SDH BIP-8类似,被用来监测误码率。
- **告警信号。**它们是后向故障指示器和后向输入定位故障(BEI/BIAE)、后向缺陷指示器(BDI),以及输入定位故障(IAE)。输入定位故障产生时的一个例子是时钟信号丢失。

  BEI/BIAE和BDI字段提供了从接收机到发射机上行的性能信息。BEI/BIAE的4个比特表示用BIP-8字节监测的故障数目,或者它可以表明存在输入定位故障。BDI比特表明是否存在信号缺陷。IAE比特提供从发射机到接收机下行的性能信息。它向接收

机报告发射机已经检测到一个定位故障。将在第6章中讨论这些告警信号如何使用。

- **通用通信信道(GCC0)**。这个2字节的字段提供光信道传送单元(OTU)终端节点之间的一条明确的信道连接。它类似于SONET/SDH的数据通信信道(DCC)。

光信道数据单元(ODU)开销

- **路径监控(PM)**。这些是用来监控端到端路径的3个字节。它类似于上面OTU开销中描述的3字节段监控(SM)字段的结构。它包含了用于路径踪迹识别符(TTI)、BIP-8和告警信号的字节。告警信号包括了路径监控状态(STAT)字段，它能用来携带告警指示信号(AIS)。(关于AIS的应用，请见5.5.4节。)STAT字段能够携带其他信号，如表明光信道是开放的。
- **串联连接监测**(TCMk, $k=1,2,\cdots,6$)。共有6个TCM字段，每个字段含3字节，与上面介绍过的路径监测(PM)字段有相同的结构。TCM字段可以被网络运营商用于监测不同应用的信号的误码性能，例如，监测通过公共网的连接性能。由于标准没有规定谁应该使用TCM字段，网络运营商必须谈判达成协议。
- **串联连接监测的激活(TCM ACT)**。这个字节还未使用。
- **故障类型和故障定位(FTFL)**。这个字节是表明前向和后向故障的256字节的多帧消息的一部分。
- **通用通信信道(GCC1和GCC2)**。这类似于OTU开销中GCC字段的2字节通信信道。
- **自动保护交换/保护通信信道(APS/PCC)**。这4字节提供一条信道用以携带自动保护交换(APS)的信令信息。APS在不同的监控级上获得支持。在第6章中，将研究不同类型的APS方案。
- **实验(EXP)**。这2字节被保留以用于实验，也可被运营商和销售商使用。
- **保留(RES)**。这些字节被保留以用于进一步的标准化。

光信道净荷单元(OPU)开销

OPU开销用来使客户信号与OTN帧适配。在OTN异步模式中，OTN帧的时钟可能与客户信号的时钟略有差别。为了处理这一失配，OPU开销能够从OTN净荷中加入或移去数据字节。

- **净荷结构标志符(PSI)**。这一字节是描述净荷的256字节多帧消息的一部分。消息的第一个字节是净荷类型(PT)。它识别帧中携带的净荷类型，如SONET/SDH、通用成帧规程(见3.3节)、复用的光信道数据单元(ODU)信号，以及测试信号的恒定比特率(CBR)情况。其余的255字节依赖于映射和串联。
- **调整(JC, NJO, PJO)**。为了处理时钟速率的差别，ODU层将从OTN帧净荷中增加或移去一个数据字节，用以调节这些差别。调整控制(JC)字节表示数据是否将由下两个字节携带:负的调整机会字节(NJO)和正的调整机会(PJO)字节。正常情况下，只有PJO携带净荷数据。为了在净荷中增加一个字节，PJO和NJO两者都携带数据，而为了从净荷中消去一个字节，无论PJO还是NJO都不携带数据。

  为了防止错误，JC值使用3个字节进行复制。选择多数(即3个中取两个)来决定实际的JC值。

3.2.3 复用技术

光传送网(OTN)支持ODU信号的复用:4个ODU1能够复用成1个ODU2,16个ODU1或4个ODU2能够复用成1个ODU3,或者ODU1和ODU2混合能够复用成ODU3。OTN也支持虚级联。这里只讨论携带4个ODU1的ODU2的OTN帧结构。

ODU2①帧被组成规模为4倍的多帧,其中每个多帧携带4个ODU1帧:ODU1[1]、ODU1[2]、ODU1[3]和ODU1[4]。这些ODU1的净荷被字节间插到ODU2帧的净荷中。

ODU2帧在它的OPU开销的PSI字节中携带有关复用信号的信息。净荷类型指明了复用的ODU信号。PSI中的第2字节到第17字节表示被复用信号的类型,例如,信号是否是ODU1、ODU2或者ODU3,以及它们在净荷中的位置。

3.3 通用成帧规程

通用成帧规程(GFP)是一种常见的方法,它使链路层中不同的分组协议适合在SONET/SDH或者光传送网(OTN)中传送,如图3.12所示。它促进了不同销售商设备之间的互操作性。

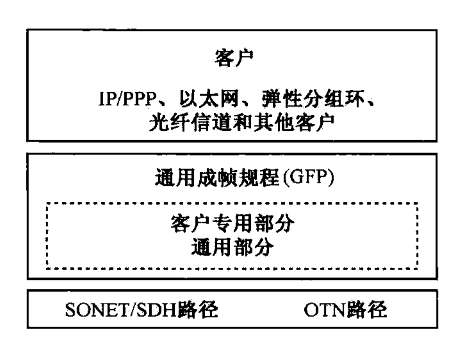


图3.12 GFP与客户和光传送路径之间的关系

分组协议可以有可变长度的分组包,如以太网、点到点协议(PPP)上的IP分组、吉比特以太网和弹性分组环(RPR);或者有固定长度的分组包,如光纤信道。对于有可变长度分组包的客户,GFP可以联合SONET/SDH虚拟级联(VCAT)和链路容量调节方案(LCAS),以提供分组链路。如3.1.2节中讨论的那样,用VCAT,能够构成一个分组链路,它具有的带宽大小正好适合客户流量,而用LCAS,链路带宽能够被调整,以满足分组流量负载的变化。对于具有固定长度分组的客户,GFP链路能够类似于恒定比特率的链路,导致低的延迟。

如图3.12所示,GFP具有通用部分和客户专用部分。GFP的通用部分是所有客户公有的基本功能,而GFP的客户专用部分具有自适应特性,它依赖于客户的协议。GFP的通用部分包括帧划分、复用、帧扰码和客户管理等功能。GFP的客户专用部分是客户信号到GFP帧的映射。存在两种映射:帧映射GFP(GFP-F)或者是透明映射GFP(GFP-T)。帧映射GFP只是将每个客户分组简单地封装到一个GFP帧中,并且可以用于可变长度的分组。透明映射

① 原文为OTU2——译者注。

GFP可应用于固定长度分组，它们用(8,10)线路码进行编码，该码需要很低的传输延迟，主要用于光纤信道。

GFP帧

GFP分为客户帧和控制帧。客户帧既是客户数据帧(CDF)，它携带客户数据；也是客户管理帧(CMF)，它携带客户信号或者GFP连接的管理信息。一种重要的控制帧是空帧，在任何时候，当GFP连接没有携带信息时就发送空帧。因此，GFP连接总是带有一幅帧。

GFP的帧结构如图3.13所示。核心头长度有4个字节，包含2字节的净荷长度标志符(PLI)。它也包含2字节的循环冗余码校验(CRC)以保护自己。PLI既能够具有以字节表示的GFP帧的长度，也可以表示这一幅帧是控制帧。

净荷区域携带有关客户净荷的信息，并且长度能够改变，其最大长度为65 535字节。它包括净荷头、净荷信息字段和可选的帧校验序列(FCS)。净荷头表示净荷的结构，净荷信息字段携带客户信号。FCS是4字节的循环冗余码校验，以保护净荷信息字段。

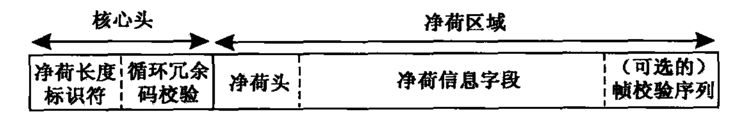


图3.13　GFP帧结构

净荷头有一个2字节的类型字段(2字节的循环冗余校验正好用以保护类型字段)和一个可选的扩展字段。扩展字段可长达60字节，所以净荷头的长度可能在4到64字节之间。如果这一帧是客户帧，则净荷类型字段有一个子字段，它表示GFP帧是客户数据帧，还是客户管理帧，并且还有一个子字段用以表示是否存在FCS。它也有一个子字段用以表示客户的协议，不论这幅帧是帧映射还是透明映射，如果净荷头存在扩展，它就表示扩展类型。对线性的和环形的变种也有扩展字段。线性扩展支持多客户共享一个GFP点到点的连接，而环形扩展支持环形结构中的多客户。例如，线性扩展具有一个8比特的信道识别(CID)字段，用以表示256个通信信道中的一个。扩展也有一个2字节的循环冗余校验。

GFP通用部分

通用GFP的一项功能是帧的划分，它主要由帧的核心头完成。回想一下，核心头包括一个净荷长度标志(PLI)字段，以及该字段的循环冗余校验。既然一个GFP连接总有一幅GFP帧，那么一幅帧的末端就是下一帧的开始。然而，如果在PLI中存在一个错误，接收机可能丢失当前帧长度和下一帧起始点。因此，它就丢失了帧的划分。那么，接收机将会使用帧核心头的循环冗余校验搜索随后下一GFP帧的起始点。特别是接收机将假定它接收到的最后4个字节是GFP帧核心头。如果核心头的循环冗余码校验完成工作，那么接收机推测这就是帧的起始点。这被称为基于帧划分的信头差错校验(HEC)。在接收机确定帧再一次被同步前，对下一个相邻帧进行附加的检验。这一技术的优点是不需要用于同步的附加比特。

通用GFP的其他的功能是扰码、复用和发送客户管理信号。GFP对核心头扰码，以保证高速的比特转换，并且对净荷区扰码，以确保不重复对核心头扰码。

存在两种复用:帧复用和客户端复用。帧复用包括由多个GFP进程得到的帧；即客户帧和控制帧被复用在一起。客户端复用获得线性和环形扩展支持。

客户管理信号可以通过客户管理帧传送。例如，客户端信号失败的消息可以被传送。

GFP 客户专用部分

客户专用的一项功能是将客户信号映射到 GFP 帧中，它是利用帧映射 GFP(GFP-F)或者透明映射 GFP(GFP-T)来实现的。正如前面提到过的，GFP-F 帧是一种客户分组数据包的封装。透明映射 GFP 比较复杂一点。首先，注意到它适用于固定长度的分组包，可用(8,10)线路码进行编码。请注意，对于 GFP 传送来说，客户信号的线路码是不需要的，因为 GFP 帧有它们自己的帧同步。因此，GFP-T 映射将首先抽取客户信号中的数据字节和控制字符。由 8 个数据字节或控制字符形成块，然后再由 8 个块组成超块。超块在 GFP-F 帧中传送。延迟是低的，因为在转发前超块不需要等待它的整个客户帧到达。

3.4 以太网

以太网是 20 世纪 70 年代创建的，是一种分组交换数据链路，通过单根同轴电缆，即通过总线，连接计算机和计算机设备。这种网络容易了解、实现、管理和维护，因而网络成本较低。从那时以后，以太网发展了多种拓扑，包括点到点连接、总线、星形和网状网，如图 3.14 所示，并且适合于各种物理通信媒质，包括同轴电缆、双绞线铜缆、无线媒质和光纤。它使用的速率范围很宽。当前典型的速率是 10 Mb/s、100 Mb/s(快速以太网)、1 Gb/s(千兆以太网或 GbE)和 10 Gb/s(10 千兆以太网或 10 GbE)。在写作本书时，40 Gb/s 和 100 Gb/s以太网正在开发中。它曾经是最早的局域网(LAN)技术之一，并且已经迅速发展成主要的 LAN 技术，以及主要的链路层技术。

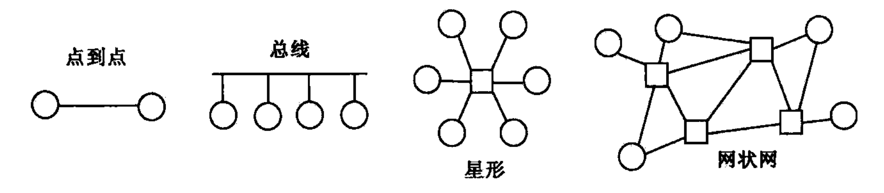


图 3.14 以太网拓扑结构

媒质接入控制(MAC)

在初始的以太网中，计算机通过网络接口卡(NIC)连接到网络的同轴电缆上，每个 NIC 有一个唯一的 6 字节以太网地址，该地址由 NIC 制造商指定。一个节点能够通过电缆发送数据包，并且传送的信号能被所有节点接收到。同轴电缆实际上是一种有效的广播通信链路。这种配置结构的问题是，同时发送数据的节点可能在相互传输时产生干扰，引起传输碰撞。由于这样的碰撞意味着不能适当地接收传输数据，因而浪费了链路带宽。

以太网利用媒质接入控制(MAC)协议来仲裁节点之间的传输。当节点需要传送分组数据包时，它先侦听链路。当检测到链路是空闲的(即没有任何信息传输)时，它再发送分组数据包，并且同时侦听该链路。如果检测到一个碰撞，那么它将停止传输，以避免进一步浪费带宽。然后，在随机选择一段时间延迟后，节点再试图重发这个分组数据包。由于碰撞中的所有节点都将在一个随机选择的延迟后重发分组数据包，因而存在一个很高的可能性，即只有其中一个节点在其他节点之前重发分组数据包。一旦这个节点重发分组数据包，别的节点

将会检测到它的发送信息，并且等待直到链路再次空闲。仲裁协议称为载波监听多址访问/碰撞检测(carrier sense multiple access with collision detection，CSMA/CD)，因为节点根据检测一个碰撞的结果，在发送和停止发送前侦听链路。

为了达到高的吞吐量，检测碰撞的时间必须比分组数据包传输时间短。然后，碰撞所花费的时间将比成功传送分组数据包的时间短。碰撞检测延迟在很大程度上取决于整个电缆的传播延迟，即该延迟依赖于电缆的长度。因而，限制电缆的长度可以使碰撞检测延迟很小。例如，10 Mb/s 以太网的最大直径约为 2500 m。既然分组传输时间反比于传输速率，对于 100 Mb/s 以太网，直径的限制将降低大约一个因子 10，变到 200 m。对于千兆以太网，直径再降低一个因子 10，直径变为大约 20 m，这样网络直径就变得太小了，很难有什么重要的实际应用。相反，以太网分组数据包的长度将增加约 10 倍。达到高吞吐量的另一个方法是帧突发(frame bursting)，它允许节点不间断地连续发送多个帧。因此，短的帧可放在一起，作为一个较长的虚拟帧发送。

到目前为止，已经假定以太网链路作为总线工作，这是最初使用同轴线装置时的情况。然而，在双绞铜线和光纤上实现了两个相反方向的单向信道。为了网络实现 CSMA/CD 协议，在一个信道上的传输信号必须在另一个信道返回。这样，如果发生碰撞，任一节点都能够检测到。

点到点链路

以太网的一个重要应用是用于连接两个终端节点的点到点链路。利用双绞线和光纤时，以太网可以选择在全双工链路下运行。由于两个信道能够同时使用，性能得到了改善。因此，CSMA/CD 协议不是必需的，因为终端节点不会产生相互传输之间的干扰。如果不使用 CSMA/CD 协议，则对帧长度和链路直径方面的限制就较少。10 千兆以太网只允许在全双工下运行，并且使用普通的以太网帧。

为了实现流控制，接收机可以给发射机发送暂停帧(pause frame)，使它暂停发送。暂停帧表示发射机在恢复发送之前必须等待的时间量。

局域网

以太网是占主导地位的局域网(LAN)技术。现在，最流行的以太网 LAN 配置是星形拓扑结构，在它的中心有一个中心枢纽连接许多以太网区段。该种拓扑在管理上有优势，因为许多网络管理功能可以在一个位置完成。它可以自然地融入办公楼宇的电信基础设施。通过中继或再生信号也改善了信号质量。

中心枢纽的一种类型是中继器(repeater)，它只是将输入信号广播发送到所有的以太网段。然后，星形拓扑结构的行为像一个单一的以太网。这种简单的设计不能很好地扩展到有许多节点的情况，因为网络带宽要对所有节点分配。这就导致每个节点接入到网络的带宽反比于节点数目。另一类能够得到更好流量吞吐量的中心枢纽是交换机(或者称为多端口桥，multiport bridge)。采用交换机后，以太网能够从星形拓扑结构扩展到网状网拓扑结构。

另一个重要的以太网功能是虚拟局域网(VLAN)。它允许网络带宽在一组节点之间共享，使每一组节点能够在自己的 VLAN 上进行通信。每一个 VLAN 都有一个独特的标志符，称为标签。以太网 VLAN 的数据包有它们自己的标签字段，以便它们可以区分和转发到其 VLAN 组中的成员。VLAN 技术能够被用来实现虚拟专用网(virtual private network，VPN)。

此外，以太网 VLAN 的数据包具有优先级字段，以支持业务质量。注意，以太网 VLAN 技术与 MPLS 技术有相似之处(见 3.6 节中关于 MPLS 的叙述)，这一技术也被用来转发数据包、分离业务和支持服务质量。

3.4.1 帧结构

基本以太网帧示如图 3.15(a)所示。

前缀(PRE)。前缀由 7 字节的 1 码和 0 码交替图样(10101010)组成，用于指示帧的起始和同步。

帧起始分隔符(SFD)。这个字节是由 1 码和 0 码交替的图样，并用两个连续的 1 码终止(10101011)组成，它表示帧的其余部分的起始。

目的地址(DA)。这个 6 字节以太网地址是帧的目的地。

前缀	帧起始分隔符	目的地址	源地址	长度/类型	净荷	帧校验序列

(a)

前缀	帧起始分隔符	目的地址	源地址	虚拟局域网信头	长度/类型	净荷	帧校验序列

(b)

图 3.15 (a) 基本以太网帧；(b) 虚拟局域网(VLAN)以太网帧

源地址(SA)。这个 6 字节以太网地址是帧的起源。

长度/类型。这两个字节既可以表示按字节数计算的数据字段的长度，也可以表示帧的类型。如果该值至多 1500 字节，那么它被解释为数据字段的长度。如果该值大于 1536 字节，那么表示该帧的类型是可选的，并且该值表示类型。

净荷。这是帧的净荷，其范围在 46 到 1500 字节。如果以太网用户需要发送的字节少于 46 个，那么净荷将被填充到 46 个字节。

帧校验序列(FCS)。这 4 个字节是帧的循环冗余校验，但不包括 PRE 和 SFD。

不计入 PRE 和 SFD 后，帧的最小长度为 64 字节，最大长度为 1518 字节。数据字段的大小在 46 字节到 1500 字节的范围。如果实际数据小于 46 字节，则加入填充字节。

回想一下，千兆以太网的帧长大约是 100 Mb/s 以太网的 10 倍，因此 CSMA/CD 协议能够有效地运行。特别是千兆以太网的帧应该有大约 500 字节的最小帧长。为了实现这一长度，扩展字段将附加到基本帧中。另一方面，如果千兆以太网链路用在点到点链路上，那么不必要将最小长度限制到 500 字节。

对于千兆以太网，一些厂商提供了 NIC 和交换机，用以支持巨型帧(jumbo frame)选项，其中分组数据包可以有高达 9000 字节的净荷。10 千兆以太网使用标准大小的以太网帧，因为它仅限于全双工链路。

对于 VLAN 的以太网帧的选项如图 3.15(b)所示。该帧具有 4 字节的 VLAN 信头，插在源地址(SA)和长度/类型字段之间。VLAN 信头的头 2 个字节位于基本以太网帧中长度/类型场位置。它的值(十六进制的 8100)表示该帧是一个 VLAN 帧。VLAN 信头中接着的 2 个字

节携带一个12比特的VLAN标签，一个值设置为0的1比特标签，以及3比特的优先权字段。优先级中的值表示帧的优先权，可从0(最低)到7(最高)。

这一选项可以用于实现服务质量。例如，优先权7可以是关键控制消息；优先权5和6可用于对延迟敏感的应用,如互动式语音和视频；优先权1到4可用于需要较低延迟(虽然不一定是最小延迟)和较低的数据包丢失的通信业务；优先权0是供尽力而为的通信业务。

在3.4.4节中将讨论更多的以太网帧结构，用于帮助运营商进行其客户的以太网通信。

3.4.2 交换机

基本的以太网交换网络拓扑结构是星形拓扑结构，如图3.14所示。中心枢纽是以太网的一个交换机(或者称为多端口桥)，它具有帧的缓存器、处理和转发表。转发表列出了网络中的以太网地址，以及每个地址来自哪里、地址的交换机端口号。交换机从它接收的帧中了解到其他节点来自哪里，并据此升级它的转发表。下面的例子说明转发帧和升级转发表的过程。

考虑在交换机处通过端口P到达的一个帧。交换机检查帧的源地址S和目的地址D。交换机转发帧过程如下。交换机将在转发表上查询D。假定D被找到，并且它的相应端口是P^*。如果P^*不是P，即这不是帧通过它所到达的那个端口，那么帧被转发到P^*。另一方面，如果P^*和P是同一端口，那么帧被下路。现在假定对于D的转发表上没有入口，则交换机将尽力而为地将该帧广播到除P以外的所有端口，以便使帧到达D。

为了升级转发表，交换机通知该帧到达了端口P。因此，交换机假定源地址S能够通过端口P找到，并且据此升级它的转发表。特别是如果在转发表上有一个源地址S的入口，那么，它用端口P更新该入口。如果没有这样的入口，它就创建一个，并将端口P预置于该入口。用这种方法，每一帧的到达都将更新转发表。注意，如果添加或删去任一节点，转发表都会自动更新。表中的入口也有生存期，每次使用过后会被刷新。如果不更新，它们最终会被删除。

生成树

如果有一个拥有以太网交换机的网络，只要网络拓扑是生成树，则以太网星形拓扑的转发机制仍然能够被应用。生成树是一个连接的网络拓扑结构，它没有任何环或圈，即它是无环的。一个无环的拓扑结构的特点是，在任意一对交换机X和Y之间只有唯一的一条路径。该特点导致交换机X只能通过唯一的一个端口转发帧到交换机Y，或从交换机Y接收帧。这将让以太网交换机保持它们的转发表。

如果网络的物理拓扑结构是一个任意的网状网，而不是树形网，则链路会被阻塞，以至于未阻塞的网络形成了生成树。被阻塞的链路不转发数据帧。图3.16(a)显示了在网状网拓扑网络中交换机形成的生成树。

生成树拓扑(STP)是一种用交换机运行的形成生成树的分布式算法。以太网链路具有指定的权重。协议在交换机中选择一个交换机作为根交换机来创建生成树[如图3.16(b)所示]。如果有多个候选根交换机，则通过比较候选交换机的以太网地址来断开连接。在选定以后，其他每一个交换机根据链路权重确定根交换机的最短路径。对于每一非根交换机，以最短路径到达根交换机的这一交换机端口是它的根端口，如图3.16(b)所示。相应的链路是树的一部分，该链路另一端的端口称为指定端口。所有其他的端口都被阻止。未被阻塞的链

路形成了一个生成树，如图3.16(b)所示。注意，根端口被用来转发分组数据包到根交换机，而指定端口被用来转发分组数据包离开根交换机到远端交换机。

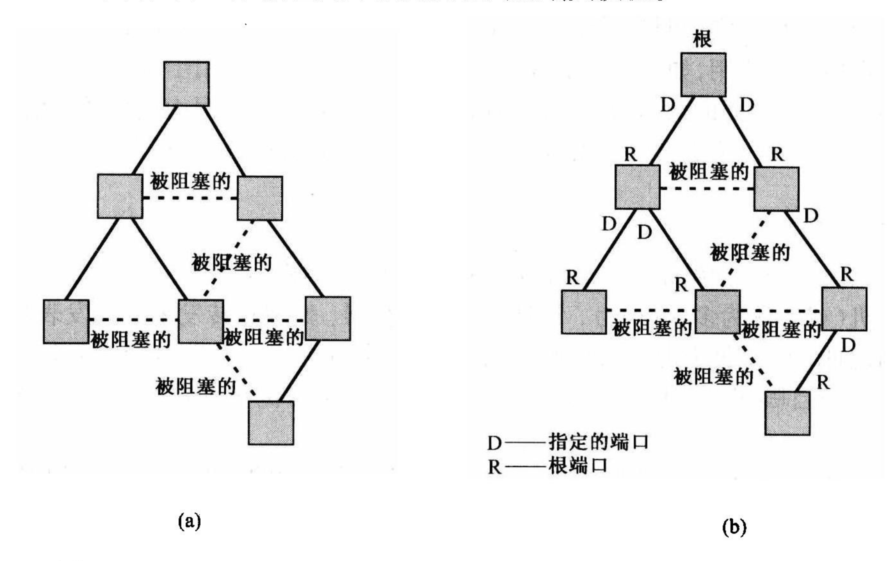


图3.16 (a) 以太网生成树；(b) 显示了根、根端口和指定的端口的生成树

为决定根交换机并计算最短路径，交换机周期性地交换所谓的桥协议数据单元的控制消息。这些消息至少携带以太网地址，它使得发送交换机相信该地址是根交换机，并且携带从发送交换机到根交换机的最短路径的权重。

已经对STP进行了许多改进，以至于原始的STP现在已经过时。改进之一是当拓扑结构改变时，快速生成树协议(RSTP)(见6.3.2节)降低了计算生成树所需的会聚时间。RSTP预先计算到根交换机的各个备份路径，使得它们在必要时能够进行切换。RSTP扩展到VLAN的协议是多生成树协议(MSTP)。每个VLAN有它自己的生成树，并且阻塞VLAN群的链路。被某些VLAN阻塞的链路可能是其他VLAN的生成树的一部分。不像STP那样，只要每条链路被某些VLAN所覆盖，所有链路就都能够被利用。

链路汇聚控制协议

交换式以太网有某些选择性，它们允许交换机有不同的线速率端口。还有一种选择，就是能够用汇聚多个并行链路到单一逻辑链路的方法建立高容量链路。这就是以太网的链路汇聚控制协议(LACP)。它将两个交换机之间的多个并行链路组合成一个链路汇聚组(LAG)，然后作为一条单一的链路运行。这里，流量在汇聚链路的入口处按逐个数据包地分开，并在构成的链路上路由，然后在汇聚链路的出口重新依次汇聚在一起。这是利用已有的低速链路增加链路容量的一个简单的方法。

注意，流量必须仔细地分割，以便分组数据包被有序地分配到各种应用，因为如果分组数据包被无序地分配，则许多应用会完成得不好。LACP利用散列函数(Hash function)在链路汇聚组中链路之间分配流量，这是根据数据包的信头信息来决定通过哪条链路转发分组的。在该方法中，对于相同应用的数据包保持有序，因为它们有同样的信头信息，并且使用散列函数通过相同链路转发。散列函数被设计成均匀地分配流量，虽然实际上分配可能是不均匀的。

3.4.3 以太网物理层

以太网有一个数据链路层和一个物理(PHY)层。至今的讨论都集中在数据链路层，其中包括媒体访问控制(MAC)子层。现在要讨论物理层，但是只限于讨论千兆以太网和10千兆以太网，因为它们是广域网和城域网中以太网的类型。

千兆以太网物理层

千兆以太网物理层开发两个部分。第一部分包括屏蔽光缆和屏蔽铜缆，而另一部分涉及非屏蔽铜缆。第一部分是物理编码子层(PCS)，它实现了一种(8,10)线路码，这是从光纤信道借鉴的编码方案(见3.8.1节)。PCS子层包括自动协商协议，它决定是否采用半双工或全双工的运行模式，以及是否应用暂停量流控制。

在PCS子层下面是物理媒质附属(PMA)子层，它串行发送速率为1.25 Gb/s的线路码，采用非归零(NRZ)信号格式。在PMA子层下面是物理媒质相关(PMD)子层，它指定物理媒质的收发器。PMD的有三种类型:短距离、长距离和屏蔽铜缆。短距离指使用850 nm波长在多模光纤中传输距离为220~550 m。长距离PMD的工作波长是1310 nm，可以在多模光纤中运行，传输距离为550 m；或者在单模光纤中运行，传输距离为5 km。在1550 nm波长下有一个非标准接口，它在单模光纤中可以传输70 km。屏蔽铜缆的PMD的传输距离为25 m。

由于双绞线的限制，非屏蔽铜缆采用了一个不同的方案。每一根电缆有4对双绞线，它们都被使用。在电缆上每次发送4个信号符号，采用5级振幅的多电平调制。非屏蔽铜缆的传输距离为100 m。

10千兆以太网物理层

10千兆以太网物理层也有物理编码子层(PCS)、物理媒质附属(PMA)子层和物理媒质相关(PMD)子层。也有光缆和铜缆的PMD。对于光缆有三种PCS可供选择:LAN PHY(局域网物理层)、WAN PHY(广域网物理层)和WWAN PHY(波长复用广域网物理层)。LAN PHY和WAN PHY两者使用(64,66)线路码。WAN PHY用于广域网。它有一个额外的WAN接口子层(WIS)，处在PCS和PMA子层之间，用来将以太网MAC帧封装到简化的SONET帧中。

LAN PHY和WAN PHY两者运行于短距离(SR)PMD、长距离(LR)PMD、扩展距离(ER)PMD和长间距多模传输(LRM)PMD。短距离PMD工作于850 nm波长，在老的多模光纤中传输距离为82 m，而在OM3多模光纤中传输距离为300 m。长距离PMD工作于1310 nm波长，在单模光纤中传输距离为10 km，在OM3多模光纤中传输距离为260 m。扩展距离PMD工作于1550 nm波长，在单模光纤中传输距离为40 km。长间距多模传输PMD工作于1310 nm波长，在多模光纤中传输距离为260 m。

WWAN PHY PCS使用4条2.5 Gb/s链路，采用(8,10)线路码。PMD是4个波长复用，既可以复用在多模光纤上(传输距离为300 m)，也可以复用在单模光纤上(传输距离为10 km)

工作在铜缆上的10千兆以太网传输距离短，但对互连和背板应用上是足够了。有一种用于双绞线电缆的PMD，其传输距离为100 m，使用了多电平调制。10GBASE-CX4 PMD的传输距离为15 m。它有4个并行信道，每个信道运行在2.5 Gb/s，采用(8,10)线路码。最便宜的铜缆PMD是CX1，它使用双芯电缆(具有两芯内导体的同轴电缆)，传输距离为10 m。

3.4.4 载波传送

随着以太网在企业中的普及，运营商提供了多点间的以太网连接。这些业务包括E-Line，它是一个以太网点到点的连接；E-LAN，它是一个多点连接，像虚拟交换机以太网那样运行；E-TREE，它是一个以太网点到多点的连接。在许多情况下，客户需要电信级的服务，包括高可用性。

此外，以太网在运营商网络内呈现出新兴的传输机制，因为这些网络内的大部分增长是由如数字视频和面向数据的业务驱动的。

支持载波传送的以太网选项是运营商桥接技术和运营商骨干桥接技术(PBB)。对于这些选项，帧信头和它的处理都被修改了，利用了多协议标签交换(MPLS)中的堆栈标签的想法(见3.6节)。

请注意，运营商能够利用其他的技术来承载以太网。对于电信级业务，能够采用SONET/SDH技术，其中采用通用成帧规程使以太网适应SONET/SDH连接。这种实现方法的缺点是SONET/SDH设备价格昂贵。

另一项技术是MPLS。正如3.6节中所讨论的那样，伪线技术能够被用来通过MPLS传送以太网业务，并且MPLS能够传递电信级业务。它也比SONET/SDH设备便宜。

虽然SONET/SDH和MPLS已经能够提供电信级业务，但是提高以太网具有重要的优势，以便它可以提供自己的电信级服务。首先，在资金支出和运行支出两方面，以太网传统上一直比SONET/SDH或者MPLS便宜，并且在许多情况下有明显的差别。因此，电信级以太网技术最终可能是最便宜的。此外，用一个协议比用混合的协议来运行和管理网络要简单得多。

运营商桥接技术

为了说明运营商桥接技术，考虑图3.17中的例子，其中有一个企业网，它有两个位于不同位置的中心局，并且中心局通过运营商的网络连接。对于其中一个中心局内的VLAN，使用普通的VLAN以太网帧。该帧有一个信头，它包括一个源地址、一个目的地址和一个VLAN标签。既然该企业是运营商的一个用户，就称这些地址和标签为用户源地址(C-SA)、用户目的地址(C-DA)和用户标签(C-Tag)。为了支持跨在两个中心局间的VLAN，运营商必须在两个中心局之间提供一个桥传送VLAN帧。运营商桥接技术可以通过如图3.17所示的、允许附加12比特的业务标签(S-Tag)来实现这一点。然后，运营商能够设定它自己的VLAN，以传送用户的VLAN流量。(运营商桥接技术有时称为Q-in-Q技术，因为以太网VLAN是根据IEEE 802.1Q标准，而桥接技术是根据正在另一个VLAN中传送的VLAN帧。)

S-Tag在运营商网络的入口处插入到以太网帧中，并且在运营商网络的出口处删去这一标签。因此，用户不能觉察到S-Tag的存在。而运营商也看不到用户的VLAN，因为运营商网络只通过S-Tag和用户地址进行帧交换。

遗憾的是，该桥接技术方案不能很好地扩展用户的数量和运营商网络的规模。首先，它只有4096个S-Tag值。其次，由于以太网支持VLAN的方式，运营商可能不得不了解所有用户的边缘器件的以太网地址，以便正确地转发以太网帧。这对于运营商骨干网中的交换机而言将是一个问题，这一骨干网运送了众多用户的流量。

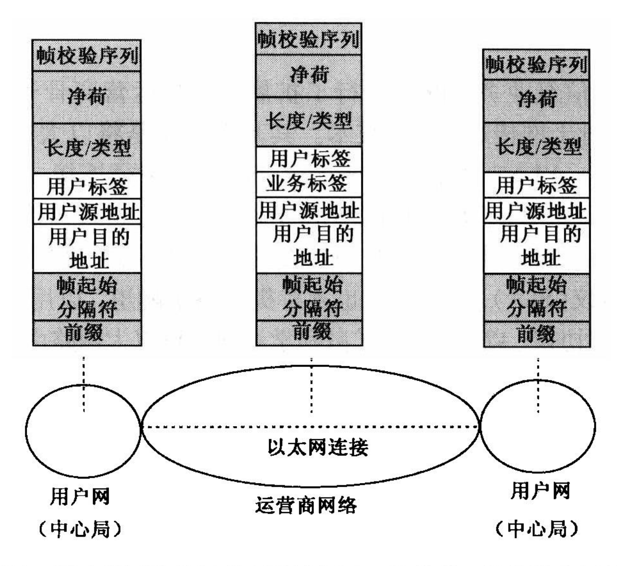


图3.17　用于VLAN的运营商桥接(Q-in-Q)技术，以及以太网帧结构

运营商骨干桥接技术(PBB)

运营商骨干网桥接技术缓解了运营商桥接技术的可扩展性。再次考虑有两个不同地点的中心局的企业网情况，它们通过如图3.17所示的运营商网络连接。假定运营商有一个如图3.18所示的骨干网络。(注意，该骨干网可能是另一个运营商的网络。)在该图中示出了以太网帧地址和标签信息。

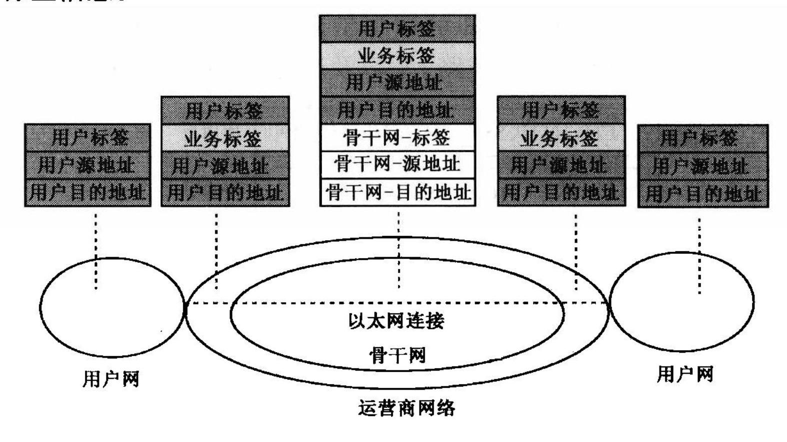


图3.18　用于VLAN的运营商骨干桥接技术(Mac-in-Mac)，以及以太网帧地址和标签信息

为了通过骨干网传送运营商桥接帧，在骨干网入口处，在该帧中插入了骨干源地址(B-SA)、骨干目的地址(B-DA)、骨干标签(B-Tag)及业务识别符标签(I-Tag)。在骨干网的出口处，这些地址和标签都被删去。骨干地址是骨干网边缘处的以太网地址，因而在骨干网内部，交换机仅使用骨干地址和标签，并且与用户信息完全分离。PBB也称为MAC-in-MAC，因为用户以太网的VLAN帧被再度封装，并配置另一个以太网VLAN信头。

请注意，B-Tag允许运营商将它的骨干网业务分割到多个广播域。带有24比特字段的业务识别符标签(I-Tag)比运营商桥的业务标签(S-Tag)允许多得多的业务实例。此外，I-Tag字段可能对骨干网核心中的交换机透明，从而降低了交换机设备的复杂性。

电信级业务

为了更好地支持电信级业务，PBB 进行了扩展，称为运营商骨干网桥-流量工程(PBB-TE)，有时称为运营商骨干网传送(PBT)技术。其基本思想是将以太网用做面向连接的传送技术，其连接是静态的。VLAN 能够被用来定义 PBB-TE 路径连接，类似于 MPLS 隧道(见 3.6 节)。正如 MPLS 那样，为了有效利用网络带宽，或者达到某种性能标准，如最大延迟、最小吞吐量或者最大丢失率，PBB-TE 连接可以被路由。请注意，为了这些连接，资源可以配置，以保证服务水平协议(SLA)。PBB-TE 也支持提供备份隧道，以用于保护。

PBB-TE 禁用生成树协议，以及广播、扩散和学习交换机以太网路由方面的问题。这就消除了以太网协议中的一些动态的、自组织的和复杂的方面，使得它更简单、更稳定和更可控。

除 PBB-TE 外，以太网的生存性机制也已经被开发，以便支持电信级业务。这些机制将在 6.3.2 节中加以介绍。

3.5 IP

IP(互联网协议，Internet protocol)是当前应用最广泛的广域网组网技术。IP 是用于无处不在的互联网中的底层网络协议，在大多数私人企业内部的计算机联网中，IP 协议同样重要。IP 是一个组网技术或者是协议，它被设计用于上述各种网络的较低层，按照经典的网络分层观点(见 1.4 节)，这些低层称为数据链路层。这是 IP 普遍成功的重要原因之一。

图 3.19 表示了分层结构体系中的 IP 协议。IP 的下一层是传统的数据链路层，包括以太网和点到点协议(PPP)。利用众所周知的数据链路层协议，如高级数据链路控制协议(HDLC)，IP 可以运行在其他低速串行线路上，以及运行在高速光纤线路上。

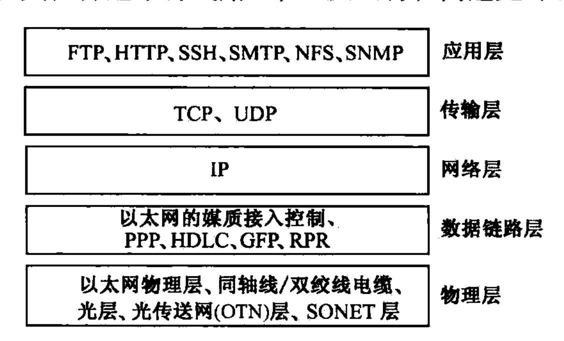


图 3.19 分层体系中的 IP 协议，它随着各种各样的数据链路层和传输层一起工作

几种分层结构可能将 IP 映射到光层。术语"IP over WDM"常用于指如图 3.20 所示的各种可能的映射。图 3.20(a)表示在 SONET 上传输分组(packet-over-SONET，POS)的实施。在这里，IP 分组数据包被映射到 PPP 帧，然后经过编码到 SONET 帧，再通过波长信道进行传输。图 3.20(c) [1]表示采用千兆或者 10 千兆以太网作为下端链路(媒质接入控制)层，以及采用千兆/10 千兆以太网物理层(PHY)，通过对帧编码使其在波长信道上传输的一种实施方案。这些不同方案的实现将在第 10 章中研究。

① 原文是图 3.20(b)——译者注。

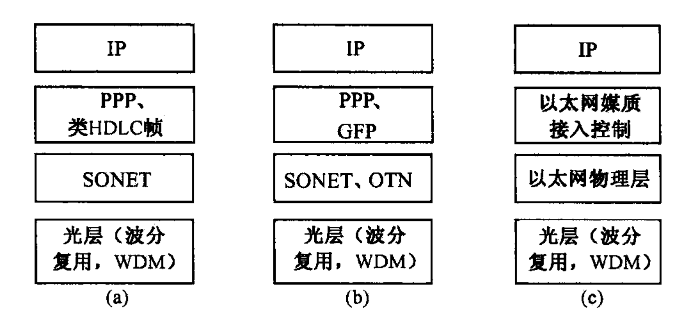


图 3.20　IP over WDM 的各种实现方案。(a) 在 SONET 上传输分组(packet-over-SONET, POS)的变异版本，其中，IP分组数据包被映射到PPP帧，然后采用类HDLC协议成帧和扰码，最终编入到SONET帧；(b)IP分组数据包被映射到PPP帧，然后，在映射到SONET或OTN路径之前利用通用成帧规程(GFP)形成帧；(c)利用千兆或10千兆以太网媒质接入控制(MAC)作为链路层，并且利用千兆或10千兆以太网物理层(PHY)将帧进行编码，使其在波长信道上传输

IP 作为一个网络层协议，并不保证可靠的、从信源到目的地按序传递数据。这一任务由传输协议完成，通常是通过传输控制协议(transmission control protocol, TCP)。另一种通常在 IP 上传送简单消息的传输协议是用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)。通常使用的一些应用程序，如文件传输协议(FTP)、超文本传输协议(HTTP)、安全外壳协议(SSH)和简单邮件传输协议(SMTP)都使用 TCP 作为它们的传输协议。其他应用则使用 UDP 作为传输协议，如网络文件系统(NFS)，它被用来在一个网络内共享文件，以及用于管理的简单网络管理协议(SNMP)。(SNMP 将在第 5 章中讨论。)UDP 也是流媒体选择的传送协议。

3.5.1　路由和转发

IP 是较早的分组交换协议之一。IP 以分组数据包的形式传送信息，这些分组数据包的长度是可变的。在 IP 网络中，IP 路由器是关键的网络单元。IP 路由器将输入链路来的分组数据包转发到输出链路。图 3.21 说明了如何将数据包转发到 IP 网络中。这种路由的性质是 IP 网的根本。这里介绍 IP 使用的经典路由机制。每个路由器维护一张路由表。对于网络中的每个目的路由器，路由表具有一个或多个入口。入口表示分组数据包需要被转发到的、与该路由器相邻的下一个节点。转发过程如下。路由器查看在一条输入链路上到达的分组数据包的信头。信头包含该分组数据包的目的路由器的识别符。然后，路由器查找它的路由表，以确定该分组的下一个相邻节点，并在通往那个节点的链路上转发分组数据包。在图 3.21 所示的例子中，考虑从节点 1 去向节点 4 的分组数据包。节点 1 查看它的表，然后转发这一分组数据包到节点 5。节点 5 再转发该分组数据包到节点 3，继续依次转发该分组数据包到节点 4，即它的最终目的地。

显然，维护路由器中的这些路由表是网络运行的核心任务。网络中的链路和节点很可能出故障，或者重新运行，并且随着时间的推移网络会增添新的链路和节点。路由器自动检测这些变化，并利用分布路由协议将它们的路由表更新。该协议的工作原理如下。每个路由器被认定为有能力确定它的链路到它的相邻路由器是上行还是下行。当任何时候路由器检测到这些链路的状态发生改变时，它将产生一个链路状态数据包，并且将该包大量转发给网络的所有路由器。这种洪泛法(flooding)是用于将信息散播到整个网络的一种技术。每个节点在

收到链路状态数据包转发这一分组数据包到与它相邻的所有链路上，只是不转发给将该数据包送来的链路。因此，这些分组数据包最终到达网络中的所有节点。收到链路状态分组的每一节点基于新的信息将它的路由表更新。随着时间的推移，网络中的所有节点都有了反映当前网络拓扑的更新了的路由表。

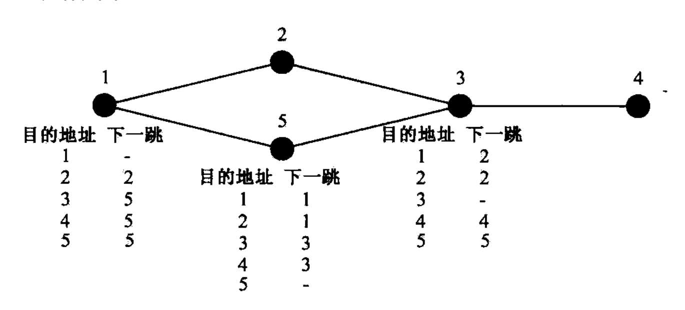


图3.21 IP 网中的路由。图中也显示了某些节点的路由表。表中包含了每一个目的地址的下一跳节点的标志

为了使得洪泛过程工作可靠，需要进行一些细微的改进。例如，链路状态分组数据包可以选择不同的路径通过网络，并经受不同的延迟。结果老的链路状态分组数据包可能在一个近期的最新版本的链路状态分组数据包之后到达。如果任其发展，则可能会造成损坏。考虑当一条链接断开后、又重新启动时，会发生什么事情。第一个链路状态分组数据包(数据包 X)指示链路已经断开，而接着的一个链路状态分组数据包(数据包 Y)指示链路已经链接。在先接收到数据包 Y 后，再接收到数据包 X 的一个节点将认为链路已经断开，虽然链路已经重新建立了。为了防止这种现象，链路状态分组数据包有一个顺序号。如果一个路由器收到的链路状态数据包低于先前收到的链路状态数据包的顺序号，则它只是丢弃该数据包。因为链路状态数据包也可能在网络中丢失，所以链路状态数据包会定期周期地产生，而不仅仅是在链路断开或建立后才产生。

利用这些链路状态分组数据包，每个路由器可以构建其整个网络的拓扑。根据该拓扑，每个路由器计算出该路由器到所有其他路由器的最短路径，并且将沿着到达每个宿节点路径中的下一个路由器的识别符存储在它的路由表中。为此目的而常用的最短路径算法是迪杰斯特拉(Dijkstra)算法[Dij59]。

在前面描述过的路由协议的一个例子是域内选路协议(intradomain routing protocol)。互联网中最常用的域内选路协议之一是开放最短路径优先协议(OSPF)——它正如前面已经描述过的那样工作。

互联网是一个很大的网络，期望每个路由器都维护整个互联网的拓扑是不实际的。为了这一目的，网络被分成多个相互关联的域。每个域被称为自治系统(autonomous system, AS)。一个单独的域间选路协议(interdomain routing protocol)被用在大型网的域之间进行路由。这样的协议的例子是边界网关协议(border gateway protocol, BGP)，读者可以在本章结尾处的参考文献中找到其详细信息。

3.5.2 服务质量

传统上，IP 网络提供尽力而为的服务。IP 尽最大努力将来自源节点的分组数据包传送到它的宿节点。然而，不同的数据包可以通过网络的不同路由，并经受随机的延迟，如果

在网络中存在堵塞，则某些数据包将被丢弃。已经做出了很大努力来改善这种状况，以便对网络用户提供服务质量(QoS)保证。在IP中已经提出了一种称为区分服务(Diff-Serv)的机制。在区分服务机制中，数据包被分成不同的级别，其IP信头中表示了级别的类型。级别类型指定了在每个路由器中如何处理数据包。标签加速转发(expedited forwarding, EF)的数据包在一个单独的队列中处理，并让其尽快通过。还指定了几个额外的保证转发(assured forwarding, AF)的优先级。AF优先级有两个属性：x和y。属性x通常表示数据包在交换之前在路由器中保持的队列。属性y表示数据包的丢弃优先级。与$y=1$数据包比较，$y=3$的数据包被丢弃的可能性更高。

当区分服务尝试解决QoS方面的问题时，它不提供任何端到端的方法，以保证QoS。例如，不能预先确定在网络中为了处理具有实时延迟所需的一个新的业务流量是否具有足够的可用带宽。这是下面将要研究的多协议标签交换的优点。

3.6 多协议标签交换

多协议标签交换(MPLS)是一个用于传送IP数据包的面向连接的技术。它有各种各样的应用。现在MPLS与其他数据包交换网一起工作，提供了与IP网工作时同样的好处。然而为了简单起见，将集中讨论它如何为IP网工作。

MPLS可以认为是IP层和数据链路层之间夹着的一层。MPLS在网络节点之间提供一个标签交换路径(LSP)。执行MPLS协议的那个路由器被称为标签交换路由器(LSR)。现在每个数据包携带一个与标签交换路径相联系的标签。每个LSR有一个标签转发表，它为每个输入标签指定输出链路和输出标签。当LSR收到一个数据包时，它提取标签，将它编入转发表，用输出标签代替输入标签，并转发数据包到转发表中规定的链路上。

这个很简单的MPLS范例在IP中有几种应用。

1. **将控制面与数据面分离：**MPLS中的基本设计理念之一是标签交换，并在每个路由器的数据包转发过程中完全与LSP如何在网络中建立和断开无关。可以将后者看做一个网络控制功能，它包括首先决定哪些LSP要建立或断开，然后实际上去建立和断开它们。这种简单的分离使我们能够为数据包转发建立优化硬件，并且不依赖于网络控制机制，允许基于不同的判据和使用不同的协议建立和断开LSP。
2. **数据包转发过程：**一个进行标签转发的LSR每秒能够处理比常规路由器多得多的数据包，因为标签交换和转发过程比传统的IP路由简单得多，并且几乎能够在硬件中实现整个过程。在前一节讨论的经典IP路由的许多功能也能够在硬件中实现，但是在IP中的路由功能和控制功能之间存在紧密关联。对控制架构的任何改变都会反映在路由行为上。作为一个结果，如果控制架构改变，则现有的硬件将不再继续保持对路由最佳。相反，在MPLS中，能够在LSR中最佳化转发硬件，它与标签交换路径的建立或断开无关。
3. **面向连接：**IP数据包转发是基于数据包的目的地址，即无连接路由。这就意味着在一个节点处具有相同目的地址的数据包将在一条公共的链路上转发出去。它与这些数据包是否具有不同的服务要求没有关系。此外，这种形式的转发可能产生不希望出现的漏斗包流量效应，并使它们过载。

MPLS 是面向连接的。它的数据包被组装到称为转发等效类(forward equivalence classes)的数据包流中，并且每个转发等效类有一个 LSP。这有几方面的含义。首先，具有不同服务需求的数据包可以分配到不同的转发等效类，并且它们的 LSP 可以取不同的路由，尽管它们有相同的源和宿节点。其次，有相同目的地址的流量可以被分开，以改进网络性能。例如，可以使各个链路上的流量负载平衡，以减轻链路拥塞。这被称为流量工程(traffic engineering)。将数据包流量分配到各个转发等效类，并且沿它们的 LSP 路由，以避免拥塞，就能够实现这一点。最后，MPLS 能够被用来在单一 IP 网上支持多个虚拟专网(virtual private network，VPN)。每个 VPN 能够转入一套独立的 LSP，允许运营商提供 QoS、安全性及在 VPN 特有基础上的一些其他政策措施。

4. **显式路由**:IP 路由遵照最短路径到达宿节点的原则。虽然这样可以有效利用网络资源，但也可能有所限制。

   MPLS 允许采用显式路由。LSP 采用显式路由，以保证它们穿过链路时对其数据包提供一定的 QoS 保证。它们能够沿着具有足够保留带宽的链路进行路由，使得 QoS 能够得到保证。显式路由能够被用来实现流量工程，并避免网络拥塞。它也能够被用来实现 VPN 业务。另一个重要的应用是由于网络故障而引起的生存性问题，其中如果主 LSP 出现故障，则备份路径 LSP 将被启用。在很多时候，备份的 LSP 不可能是最短的路径。

确定在网络中要建立哪些 LSP 可能是一个复杂的过程，这依赖于目标和应用。幸运的是，正如较早指出的那样，此项功能与 LSR 中的标签交换机制完全无关。例如，如果目标只是减小数据包延迟，则可以在有大量流量通过的一对节点之间建立 LSP。如果目标是为了提供 QoS 保证，将根据网络的带宽可用性建立 LSP。

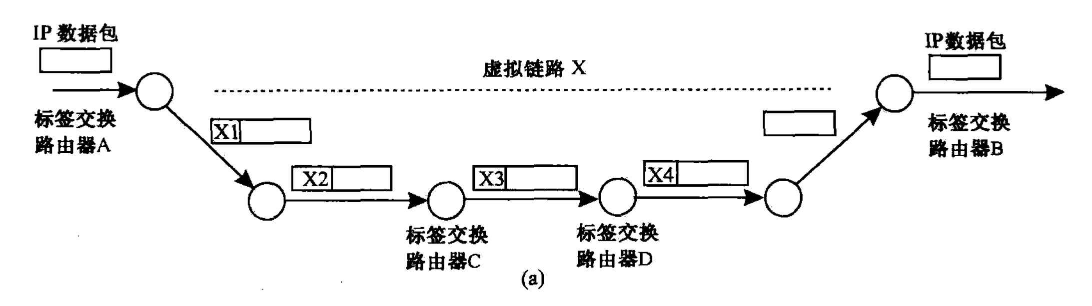
3.6.1 标签和转发

图 3.22(a)表示了标签和转发的概念。一个在 LSP X 上发送的 IP 数据包在该 LSP 的入口处得到一个标签 X1。而在随后的 LSP 中，数据包标签能够随着链路的改变而改变。这被称为标签交换。注意，在 LSP 的倒数第二个节点处,标签将被删除或弹出。实际上，这是不需要的，因为它正在退出 LSP。这就是众所周知的倒数第二跳消除处理，这样做使得 LSP 的最后一个节点没有什么需要处理。对于 LSR A 和 B，LSP X 的行为像一个点到点的虚拟链路。常常称这一链路为隧道，因为它通过传统的 IP 路由层的下面，并且这就是为什么将 MPLS 看做传统的 IP 层和链路层之间的一个层的原因。

MPLS 扩展了隧道的概念，允许 LSP 有它们自己的 LSP 隧道，如图 3.22(b)所示。该图再一次考虑了 LSP X，而且用一条 LSP Y 代替了用实际链路连接的 LSR C 和 D。因此，LSP Y 是 LSP X 的一条隧道。一个 IP 数据包使用 X 的标签来通过 LSP X。然而，当它到达 LSR C 时，LSR 将插入一个用于 LSP Y 的标签，并沿着 LSP 将它转发。当它到达 LSR Y 的终端时，用倒数第二跳消除处理的方式将该标签消除。在 LSR D 处，数据包继续处在 LSP X 上。注意，标签从数据包中加入和删除如同堆栈那样。好的堆栈组织的属性是通过网络转发数据包，只检查标签堆栈的顶部即可。注意，多个 LSP 可能使用一个常用的 LSP 隧道作为虚拟链路。

一个 MPLS 数据包有一个 4 字节的 MPLS 信头,包括一个 20 比特的标签字段、一个 3 比特的实验(EXP)字段、一个栈底标记和一个 8 比特的生存时间(TTL)字段，如图 3.23(a)所

示。TTL是表示数据包已经处在网络中多长时间的一个指示器；当数据包在网络中的停留时间超过TTL时，该数据包就被丢弃。这有助于消除正在误传并且在网络中逗留不去的数据包。3比特实验字段可能应用于服务质量的实现，正如3.6.2节中所讨论的那样。



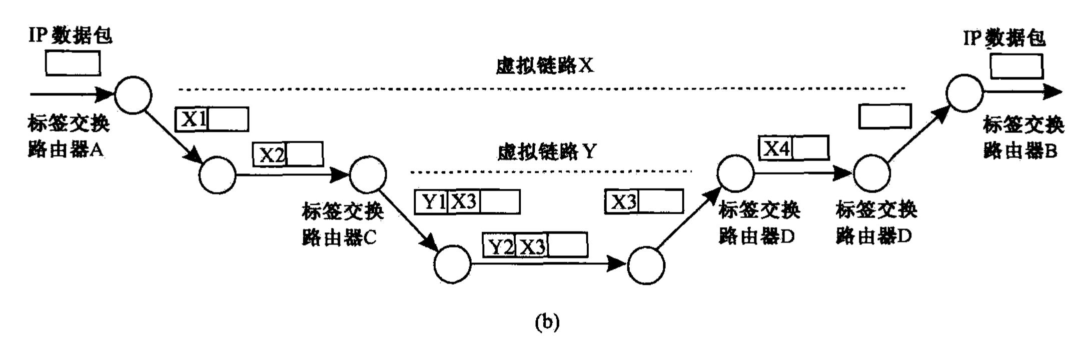


图3.22　(a) 一条简单的标签交换路径X；(b) 标志交换路径X的一条标签交换路径隧道Y

这些MPLS信头被堆放在IP数据包的前端，如图3.23(b)所示。为了转发数据包，LSR必须能够处理堆栈顶部,无论是推进信头、信头出栈，还是交换标签。

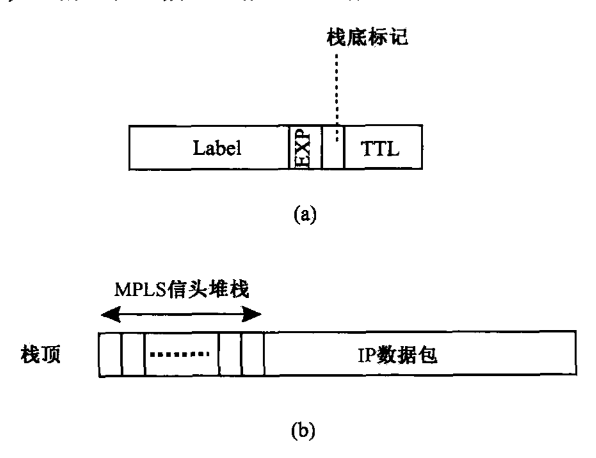


图3.23　(a) MPLS标签；(b) 预置在IP数据包前面的LSP标签堆栈

MPLS标签的范式能够简化运作，降低复杂性，使得大型网络具有较好的可扩展性。已经看到，标签栈只需处理它们的顶部。使用一条携带有多种成分LSP的共同的LSP隧道能够降低复杂性，因为中间的LSR只处理单个隧道，而不是所有LSP。此外，分级组织的网络能用LSP隧道来简化它们的运作。例如，考虑一个网络N与骨干子网B。假定骨干子网B在它

的边缘 LSR 之间有穿过该网的 MPLS 隧道，而网络 N 在它的边缘 LSR 之间存在 LSP。需要注意的是，网络 N 的 LSP 可以使用子网 B 的隧道。为了建立和运行网络 N 的 LSP 和子网 B 的隧道，在 B 网外面的 LSR 可能不知道 B 网内的 LSR，反之亦然。

3.6.2 服务质量

MPLS 支持服务质量。首先，每个 MPLS 信头有一个 3 比特的实验(EXP)字段，可以用来放置优先级或服务等级的值。LSR 根据这些值来处理和转发数据包。例如，有高优先级的数据包能够在低优先级的数据包之前发送。其次，有同样服务质量要求的数据包可以被分组在一起，作为转发等价类。然后，LSP 和它的 MPLS 标签与一个相应的服务等级对应。为了满足服务质量要求，LSP 可以被路由，以便沿着该条路由有足够的资源。此外，LSR 能够处理和转发 LSP 的数据包，以满足这些要求。

一种类型的服务质量是可靠保证的，如最小带宽、最大延迟、最大丢包率和最大抖动。综合服务(Int-Serv)支持细粒度的可靠保证。然而，它需要各个路由器中大量的状态信息。3.5.2 节中讨论过的区分服务(Diff-Serv)需要少得多的状态信息，并且能够满足许多应用的需要。

3.6.3 信令和路由

MPLS 的初始信令协议是资源预留协议(RSVP)和标签分配协议(LDP)。根据这些协议，当入口 LSR 需要建立一条 LSP 时，它发送一个请求消息到出口 LSR。出口 LSR 沿着相反路径发送应答消息，同时沿着这一路径设立了标签转发表。请求和应答消息都沿着那些被限于 IP 最短路径路由的路径传输，所以 LSP 都是沿着最短路径路由的。

资源预留协议-流量工程(RSVP-TE)和基于路由受限标签分发协议(CRLDP)升级到了 RSVP 和 LDP，以至于 LSP 路由可以由入口 LSR 明确定义。现在，入口 LSR 能够为一条新的 LSP 计算一条路径，并且将这一路径的信息存储在请求消息中。请求消息使用它携带的信息沿这一路径行进。应答消息沿着反向路径行进，沿着这一路径建立标签转发表。

为了计算 LSP 路由，入口的各个 LSR 收集网络拓扑信息和每条链路的资源信息。例如，使用相同的机制用于收集 IP 路由拓扑信息。能够计算一些路径，使这些路径避免采用那些不能支持 LSP 的业务等级的链路，如那些带宽不足的链路。

3.6.4 载波传送

MPLS 技术能够被运营商用来为客户实现连接服务，特别是数据包传送服务。一个客户服务的例子是 3.4.4 节讨论过的以太网连通性。

对于网络运营商，MPLS 已经广泛地用做信令协议，如 LDP 和 RSVP-TE，以及别的运行和管理功能。它的标签处理能力使得它能够扩展到大网络。它支持服务质量，以确保服务水平协议(SLA)和流量工程，优化网络资源。此外，它具有电信级生存性功能(见 6.3.4 节)。因此，能够支持电信级业务。

利用伪线技术，MPLS 能够对各种协议提供连接服务。伪线是在数据包交换网上的一种连接服务，在许多情况下，该网就是 MPLS。例如，在 MPLS 上有一条以太网伪线，它有一条

类似于以太网连接的 MPLS 连接。正如 3.4.4 节中提到的，支持以太网流量是很重要的。例如，企业客户利用它连接不同地点的办公室，而以太网被用来传输数字视频。

传送 MPLS（T-MPLS）是另一种网络技术，它支持数据包流量的电信级传送业务。T-MPLS 和 MPLS 不是同等级的网络，所以 IP/MPLS 数据包必须再封装，以便在 T-MPLS 连接中传送。因此，T-MPLS 必须再用 MPLS 架构并将其简化。它增加一些功能，以支持双向连接，因为 MPLS 是一种单向技术。由于期望 T-MPLS 连接有很长寿命，因此 T-MPLS 具有保护倒换功能，以及在普通的 MPLS 中没有的运行和管理功能（见 6.3.4 节关于保护倒换的内容）。由于关注传送 MPLS 与普通 MPLS 之间兼容性，因此对 T-MPLS 的开发已经暂时停止，而对一种新的 MPLS 的研究已经开始，它被称为传送多协议标记交换（MPLS-TP）。这一新的开发将可能会结合 T-MPLS 的某些方面的内容。

3.7 弹性分组环

弹性分组环（RPR）是一种分组交换环形网，它如 IP 数据那样传送数据分组包，可用于城域网和广域网。RPR 提供不同的服务。它对效仿恒定比特率、低延迟的业务有可保证的带宽，并对尽力而为的业务有公平的接入。环形网拓扑对故障是有弹性的，特别是在单条链路或单个节点出现故障后仍保留了连接。在 6.3.1 节中将讨论 RPR 故障恢复机制，设计使之有 50 ms 的恢复时间。RPR 像以太网那样处在链路层。它有自己的帧结构，具体描述见文献 [DYGU04]。它可以够映射到千兆以太网物理层、10 千兆以太网物理层或 SONET/SDH 的帧中。

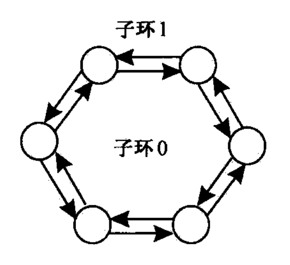


图 3.24　弹性分组环网的子环 0 和子环 1

环形网是一个双向网，它由两个反向旋转的环构成，它们被称为子环 0 和子环 1，如图 3.24 所示，其中链路具有相同的容量。源节点发送一个 RPR 帧，将它插入到子环之一并传送到它的宿节点。然后，该帧被中间节点转发，直到达到其宿节点，经交换后它从子环输出。注意，有两种类型的帧：过环帧（transit frame），它已经接入到一个子环；入口帧（ingress frame），它是一些新的帧，正等待加入到一个子环中。

RPR 有一个媒质接入控制（MAC）协议，以接入一个子环。每个节点将过环帧和入口帧分开排队，如图 3.25 所示。MAC 确定哪些帧有进入输出子环链路的接口，哪些帧不需要预先抢占就能发送到这一链路上。在输出链路上，MAC 给予过环帧优于入口帧的优先权，保证它们永不被丢弃。此外，入口帧在输出链路上开始传输以后，可以有一个正在到达的过环帧从输入子环链路到达。因而，MAC 不允许入口帧接入一条输出子环链路，除非在输运队列中存在空间用于插入输入的过环帧。因此，RPR 网络从来不丢弃数据包。

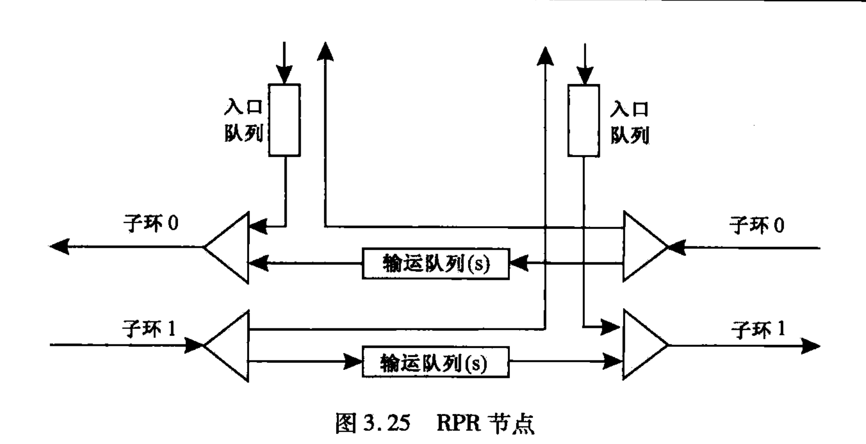


图 3.25 RPR 节点

3.7.1 服务质量

RPR 支持三个流量等级。

A 级。这一级具有低的延迟和抖动。当接入到一个子环时，它具有高的优先权。它又分为 A0 和 A1 两级，两者已经预分配了网络带宽，以保证它们的延迟和抖动。预分配给 A0 等级流量的带宽称为保留的，它仅能用于节点的 A0 流量。如果节点没有足够的 A0 流量，则预分配的带宽闲置。另一方面，预分配给 A1 级的带宽称为可收回的，因为未被使用的带宽可以用于其他级别的流量。

B 级。这一级别具有可预见的延迟和抖动。当接入到一个子环时，这一级具有中等优先权。B 级的流量被分成 B-CIR(承诺信息率)级和 B-EIR(突发信息率)级。B-CIR 级类似于 A1 级，因为它具有预分配网络带宽，以保证它的延迟和抖动，而带宽是可收回的。B-EIR 级数据包称为公平合格的(FE)，因为根据 3.7.3 节叙述的 RPR 的公平机制，它们能够接入未被使用的和未被保留的带宽。

C 级。这一级是尽力而为的传送。当接入到一个子环时，这一级的流量有低的优先权。C 级的流量也是公平合格的，因为根据 RPR 的公平机制，它能够接入到未被使用的和未被保留的带宽。

3.7.2 节点结构

图 3.26 显示了子环 0 的节点结构。存在主过环队列(PTQ)和可选的次过环队列(STQ)。两者都是先进先出(FIFO)的队列。如果节点以单一队列模式构成，那么仅存在主过环队列。对于这种模式，过环流量具有高于入口流量的优先权。因而，只有在主过环队列空闲时，入口流量才能接入到环中。

在双队列模式中，主过环队列是 A 级的过环流量，而次过环队列用于 B 级和 C 级过环流量。在主过环队列中的 A 级过环流量具有接入输出链路的最高优先权。如果主过环队列是空的，并且次过环队列是“满”的，则次过环队列就具有接入这一链路的优先权。该队列是满的，或者不依赖于它的占有率是否在预定阈值之上或之下。如果主过环队列是空的，并且次过环队列也不是满的，那么入口流量就能够接入到输出链路。

注意，无论在单队列模式中，还是在双队列模式中，A 级流量有比所有其他流量都高的优先权。既然它有预分配的带宽，那么它将经受低的延迟，包括传输延迟和中间节点处的低的排队延迟。

如图3.26所示，流量整形器(traffic shaper)调节入口流量接入到网络的速率。流量级别A0、A1和B-CIR按它们的预定带宽被调节接入到环网中。对于公平合格级别(即B-EIR级和C级)的入口流量，存在一个流量整形器。它们将其速率进行动态调整以满足公平性，正如3.7.3节中所叙述的那样。也存在一个下行流整形器(图中没有显示)，它限制从该节点来的、在其输出链路上的所有流量，除非是A0级流量。这就确保了从该节点来的所有流量不会超过未保留的速率。

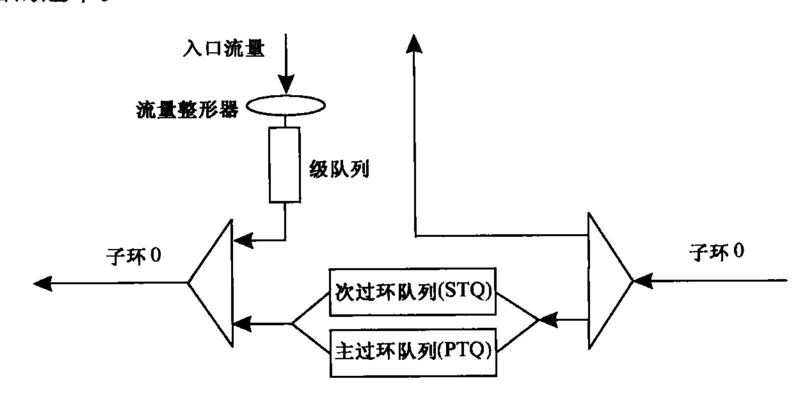


图3.26　双输运队列情况下的子环0的节点结构:主过环队列和次过环队列。STQ是可选的

3.7.3　公平性

公平合格流量，即B-EIR级和C级的流量可以使用可收回的或未被保留的带宽。然而，由于在子环上过环流量相对于入口流量有优先权，因而存在一个固有的不公平性，即在下游节点之前，上游节点就有了接入信息。如果存在从上游节点来的公平合格流量的重流量负载，那么下游节点就可能分配不到任何带宽。为了保证公平合格流量所有的节点能够有同等的接入带宽，RPR使用了一种公平准入方式，这一问题将在下面讨论。RPR采取不均匀共享带宽，这可通过给每个节点规定一个合理的权重，并设定节点带宽正比于它的权重来实现。不过为了简化讨论，将假定所有节点都具有同等的接入带宽。

考虑一个节点 k 及其在一个子环(如子环0)上的输出链路。存在两种可选的公平性协议。

激进模式。这是关于双队列的情况。现在，如果节点 k 的次过环队列在预先给定的阈值以上，或者它在链路上的传输速率高于未保留的带宽，即链路正在使用某些保留给A0级流量的带宽，则认为该节点的输出链路是拥堵的。

当节点 k 有一个拥堵的输出链路时，它决定正在发送入口流量的速率。这一速率称为它的本地公平速率(local fair rate)。拥堵的部分原因可能是，在该小环上的从节点 k 上行的节点以高于节点 k 的速率发送它们的入口流量。确定本地公平速率以后，节点 k 将该速率发送给它的上游节点。然后，一个上游节点将按节点 k 的本地公平速率限制它自己的入口流量速率。用这种方法，节点 k 能降低上游节点的入口流量速率，使这些节点获得更多的带宽。这能够为节点 k 释放带宽。

如果节点 k 有一条不拥堵的输出链路，那么它将会周期性地并逐渐地增加它的入口流量的传输速率。

保守模式。这是单一队列的情况。有两个预先设定的阈值传输速率:低阈值，它表示输出链路已经变得拥堵；高阈值，它表示链路太拥堵了。高阈值高于低阈值，但是常常低于该链路的实际容量。

如果节点 k 在其输出链路上的传输速率高于低阈值速率，或者相邻的传输之间的时间间隔超过了规定的最大延迟，则该节点将认为它的输出链路是拥堵的。当节点拥堵时，它定期计算其本地公平速率，这是上游节点正在通过它的输出链路发送的速率估值。它将这一速率值发送到它的各个上游节点。然后，这些上游节点将那些需要利用节点 k 的输出链路的入口流量速率限制到节点 k 的本地公平速率上。

节点 k 依据下述方法决定本地公平速率。如果节点 k 刚刚变得拥堵，则它通过其输出链路的未保留带宽数量除以通过该链路发送流量的上游节点数量来计算其本地公平速率。如果节点 k 已经持续拥堵，一种情况是如果它的输出链路未被充分利用，即它的流量速率低于低阈值速率，则它将逐渐增加其本地公平速率。另一种情况是，如果它的输出链路被过度使用，即它的流量速率高于高阈值速率，则它将逐渐降低其本地公平速率。

3.8 存储区域网

存储区域网(SAN)是用来将计算机系统与其他一些计算机系统及外围设备互连的网络，这些设备包括磁盘驱动器、打印机及磁带驱动器等。这些网络由具有中等到大型数据中心的一些企业建立。图 3.27 显示了一个典型的 SAN 网，它互连多个 CPU 和各种外围设备。SAN 的一个关键部分是一个交换设备，它在各个连接的设备之间提供可重构的链接。在下面讨论的 SAN 都使用电路交换的方式，在所连接的设备之间可以按照需要快速建链和拆除。

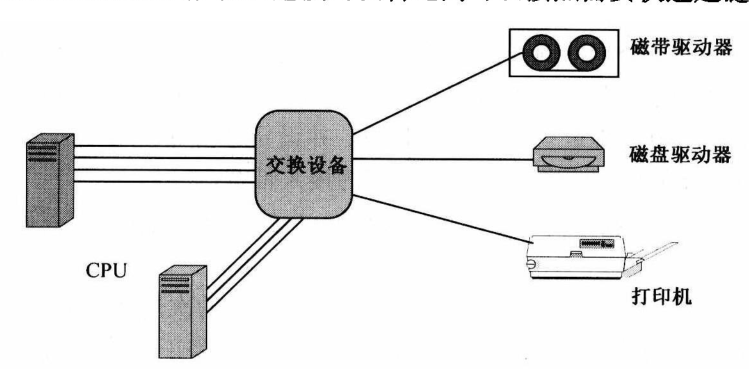


图 3.27 存储区域网络的结构

在安装初期，整个 SAN 建立在一座建筑物内或校园内，但今天的网络分布在更广泛的大都市地区，并通过一些链路延伸到长距离网络。这样做的原因之一是，能够提供对抗各种损坏的应变能力。一个常用的方法是保持两个数据中心，一个中心的数据在另一个中心备份。分散布置网络的另一个理由是，将外围设备和其他设备放在远离大城市的郊区，这里的房地产价格比较便宜。

通常，SAN 运行的比特率从 200 Mb/s 到大约 10 Gb/s，大多数情况下都运行在光纤链路上。从光层观点看，使它们变得重要的原因是在两个数据中心之间存在大量的连接。大型机

将数以百计的输入/输出(I/O)信道与其他设备连接在一起。两个数据中心之间有成百上千条链路的网络并不鲜见。

3.8.1　光纤信道

光纤通道(见表3.5)在20世纪90年代初开发，并已成为最主要的存储区域网络。这一协议将开销加到数据中，然后利用(8,10)线路码将信号编码，以便在光纤中传输。(16GFC，一种开发中的16 Gb/s标准，使用一种新的线路编码方案，以得到更好的效率。)在该表中，已经表示了数据速率和光纤中的实际传输速率，后一速率是在增加了开销和经线路编码后得到的。

表3.5　光纤信道存储区域网

名　称	数据速率/(MB/s)	传输速率(Gb/s)
1GFC	100	1.063
2GFC	200	2.125
4GFC	400	4.252
8GFC	800	8.504
10GFC	1000	10.519

光纤信道结构包括计算机上和外设上的I/O端口，以及一个电子交换机。已定义了铜线和光纤的接口，实际上光纤接口已经得到广泛应用。波长为1300 nm和1550 nm的长波长激光器被用于单模光纤，传输距离达到几十千米。波长为850 nm的短波长激光器用于多模光纤，传输距离达到几百米。

总结

本章研究了光层中的几种重要的客户层。这些技术已经被广泛应用于公共电信网及专用企业网。在北美的公共传输基础设施以SONET为主，SDH则在世界其他大部分地区使用。SONET/SDH为低速数据流提供了有效的时分复用技术，允许这些数据流以一种可靠的、良好的管理方式在网络中传送。光传送网是一种替代性和新兴的技术。通用成帧规程是用于各种分组交换网络的这些物理层协议中的一种机制。

现在最主要的网络层协议是IP。大多数进入网络的数据流是IP流，它受到互联网和企业内部网络增长的刺激而飞速发展。IP主要提供从源节点到宿节点之间的尽力而为的分组路由，并没有连接的概念。MPLS已经出现，扩展了IP的使用领域，允许显式分组路由沿着确定的路径通过网络。

以太网是另一种分组网技术。它用在企业领域，在运营商内部传送信息。以太网也有物理层，它支持1 Gb/s和10 Gb/s速率的光信号传送。

弹性分组环是一种替代SONET/SDH环网的用于数据分组流量的环网技术。它提供不同的服务，包括保证带宽服务、尽力而为的服务和公平接入的服务。由于它具有环网结构，因此它对故障具有承受力。

各种存储区域网络构成另一类重要的使用光纤的传输网络，利用它们将计算机和其他计算机及其外围设备连接起来。光纤信道是这类网络中的主流技术。

进一步阅读材料

一本涵盖 SONET 和 IP 普通参考书是由 Walrand 和 Varaiya 合著的书[WV00]。有非常大量的讨论 SONET/SDH 方面的文献。在文献[SS96]中广泛收集了一系列的文章，其内容涵盖了复用标准、网络拓扑及性能和管理。为了深入研究这方面课题，还可以参看 Sexton 和 Reid 的著作[SR97]，以及文献[Gor00]。美国国家标准委员会(ANSI)和国际电信联盟(ITU)已经制定了 SONET/SDH 体系的详尽的标准。此外，Telcordia 已经为设备提供商出版了通用的标准。可以在 www.itu.ch、www.ansi.org 和 www.telcordia.com 上获得一系列有关标准的文件；其中一些标准列在了附录 C 中。Telcordia 的 GR-253[Tel99]对 SONET 体系进行了广泛的描述，在本章中已经做了大量的应用。虚串联(VCAT)和链路容量调节方案(LCAS)的概要能够在文献[BCRvH06]中找到。

光传送网(OTN)是根据标准 ITU-T G.709[ITU03]构建的。OTN 的性能能够利用“增强的”前向纠错码(FEC)得到增强。ITU-T G.975.1 规定了其中一些内容，它们常被称为超级 FEC 方案[ITU04]。

在文献[BRM02, HVSZ02]中给出了有关通用成帧规程(GFP)的全面评述。GFP 是一个 ITU 标准[ITU01]。

想了解 IP 和 MPLS 的读者可能被信息淹没。对于 IP 的概要介绍请见文献[PD99, Per99]。为了更详细地了解 TCP/IP，请见文献[Com00, Ste94]。为了更详细地了解 MPLS，请见文献[DR00]。互联网工程任务组(www.ietf.org)发展和维护这些标准，使得所有标准文档(RFC——意见请求)一应俱全。有一个 IP/MPLS 论坛(www.ipmplsforum.org)。在 ITU 标准 G.8110/Y.1370[ITU06]中规定了传送 MPLS。

在 MPLS 之前，用于 IP 数据包的面向连接的路由协议是异步传输模式(ATM)。附录 J 有关于这一协议的描述。

以太网标准是由 ANSI 和(美国)电气与电子工程师协会(IEEE)给出的。IEEE 的网址是 www.ieee.org。为了详细了解千兆以太网，可参看 www.gigsbit-ethernet.org。以太网标准是 IEEE 802.3。在 IEEE 802.1Q 标准中定义了以太网的虚拟局域网(VLAN)，在 IEEE 802.1ad 标准中定义了运营商桥接技术，在 IEEE 802.1ah 标准中定义了运营商骨干桥接技术，以及在 IEEE 802.1Qay 标准中定义了运营商骨干桥接技术-流量工程。有一些关于电信级以太网专题的 IEEE 通信杂志系列期刊[MPH08, NSG08]。电信级以太网的产业联盟是城域以太网论坛，它的网址是 metroethernetforum.org。

关于弹性分组环的辅导教材，可以在文献[DYGU04]中找到。在 IEEE 802.17 标准中，对 RPR 进行了详细的规定[IEE04]。在文献[GYB+04, YGK04]中，叙述和分析了它的公平接入机制。

已经建立了光纤通道的 ANSI 标准。文献[Cla99, TS00]大体上提供了关于存储区域网络的初级读本，集中在光纤信道的解决方案。光纤信道工业协会(FCIA)为光纤信道维护了一个网站：www.fibrechannel.org。

习题

3.1 在SONET或光层内有哪些子层负责处理下述功能?
  (a) 一条SONET路径出现故障，并且流量必须交换到另一条路径上。
  (b) 许多SONET数据流需要复用到一个更高速率的数据流中，并在一条SONET链路上传输。
  (c) 一芯光纤出现故障，在链路终点的SONET线路终端需要将故障光纤上的流量重路到另一芯光纤中。
  (d) 在中继器之间的SONET链路上的误码率需要被监测。
  (e) 通过网络的STS-1数据流的连通性需要被验证。

3.2 在表3.3中，计算不同类型的SONET系统的等效距离限制。假定在1550 nm波长处损耗为0.25 dB/km，1310 nm波长处损耗为0.5 dB/km。

3.3 你必须在一条链路上连接两个运行在STM-16线路速率的SDH机柜，任何地方的链路的损耗可能从0到7 dB。遗憾的是，这两个机柜不支持同样的接口。其中之一支持I-16接口，而另一个支持S-16.1接口。表3.6中，根据ITU推荐标准G.957给出了这些接口的详细规格。你能否找到一种方法连接这两个机柜，并且使链路能够合理工作? 允许你在链路中使用可变光衰减器。

表3.6 根据ITU G.957标准的STM-16局内链路和短距离接口的规格

参　数	I-16	S-16.1
发射机	MLM	SLM
波长范围	1.3 μm	1.3 μm
发送功率(最大)	−3 dBm	0 dBm
发送功率(最小)	−10 dBm	−5 dBm
接收灵敏度(最小)	−18 dBm	−27 dBm
接收过载(最小)	−3 dBm	0 dBm

参考文献

[BCRvH06] G. Bernstein, D. Caviblia, R. Rabbat, and H. van Helvoort. Vcat/lcas in a clamshell. *IEEE Communications Magazine*, 44(5):34–36, May 2006.

[BRM02] P. Bonenfant and A. Rodriguez-Moral. Generic framing procedure (gfp): the calalyst for efficient data over transport. *IEEE Communications Magazine*, 40(5):72–79, May 2002.

[Cla99] T. Clark. *Designing Storage-Area Networks*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1999.

[Com00] D. E. Comer. *Internetworking with TCP/IP: Vol. I: Principles, Protocols and Architecture*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2000.

[Dij59] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerical Mathematics*, pages 269–271, 1959.

[DR00] B. S. Davie and Y. Rekhter. *MPLS Technology and Applications*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2000.

[DYGU04] F. Davik, M. Yilmaz, S. Gjessing, and N. Uzun. Ieee 802.17 resilient packet ring tutorial. *IEEE Communications Magazine*, 42(3):112–118, Mar. 2004.

[Gor00] W. J. Goralski. *SONET*. McGraw-Hill, New York, 2000.

[GYB+04] V. Gambiroza, P. Yuan, L. Balzano, Y. Liu, S. Sheafor, and E. Knightly. Design, analysis, and implementation of dvsr: a fair, high performance protocol for packet rings. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(1):85–102, Feb. 2004.

[HVSZ02] E. Hernandez-Valencia, M. Scholten, and Z. Zhu. The generic framing procedure (gfp): an overview. *IEEE Communications Magazine*, 40(5):63–71, May 2002.

[IEE04] IEEE. *Resilient packet ring (RPR) access method and physical layer specifications*, 2004. 802.17-2004.

[ITU01] ITU-T. *Recommendation G.7041/Y.1303: Generic framing procedure (GFP)*, 2001.

[ITU03] ITU-T. *Recommendation G.709: Interfaces for the optical transport network (OTN)*, 2003.

[ITU04] ITU-T. *G.975.1: Forward error correction for high bit rate DWDM submarine systems*, 2004.

[ITU06] ITU-T. *Recommendation G.8110.1/Y.1370.1: Architecture of transport MPLS (T-MPLS) layer network*, 2006.

[MPH08] A. McGuire, G. Parsons, and D. Hunter, editors. *IEEE Communications Magazine: Series on Carrier Scale Ethernet*, volume 46, Sept. 2008.

[NSG08] T. Nadeau, V. Sharma, and A. Gusmante, editors. *IEEE Communications Magazine: Series on Next-Generation Carrier Ethernet Transport Technologies*, volume 46, Mar. 2008.

[PD99] L. L. Peterson and B. S. Davie. *Computer Networks: A Systems Approach*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 1999.

[Per99] R. Perlman. *Interconnections: Bridges, Routers, Switches, and Internetworking Protocols*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1999.

[SR97] M. Sexton and A. Reid. *Broadband Networking: ATM, SDH and SONET*. Artech House, Boston, 1997.

[SS96] C. A. Siller and M. Shafi, editors. *SONET/SDH: A Sourcebook of Synchronous Networking*. IEEE Press, Los Alamitos, CA, 1996.

[Ste94] W. R. Stevens. *TCP/IP Illustrated, Volume 1*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.

[Tel99] Telcordia Technologies. *SONET Transport Systems: Common Generic Criteria*, 1999. GR-253-CORE Issue 2, Revision 2.

[TS00] R. H. Thornburg and B. J. Schoenborn. *Storage Area Networks: Designing and Implementing a Mass Storage System*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2000.

[WV00] J. Walrand and P. Varaiya. *High-Performance Communication Networks*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2000.

[YGK04] P. Yuan, V. Gambiroza, and E. Knightly. The ieee 802.17 media access protocol for high-speed metropolitan-area resilient packet rings. *IEEE Network*, 18(3):8–15, May-June 2004.

第 4 章　波分复用网络中的组件

在第 1 章已经探索了配置波分复用(WDM)网络的动机，在第 10 章还要继续探讨这一课题。这些网络在网络节点到其用户(或客户)之间建立电路交换的、端到端的光信道(optical channel)，或者称为光路(lightpath)。一条光路包含网络两个节点之间的一条光信道，或者波长，该光路通过多个中间节点进行路由。中间节点可以交换和转换波长。因此，这些网络可以被认为是波长路由(wavelength-routing)网络。光路根据网络用户的指定来建立和拆除。

本章将探讨作为这种网络一部分的网络组件构造方面的问题。这样一个网络的结构如图 4.1 所示。该网络包含光线路终端(optical line terminal，OLT)、光分插复用器(optical add/drop multiplexer，OADM)和光交叉连接(optical crossconnect，OXC)，它们通过光纤链路互连在一起。该图中没有显示光线路放大器，它们沿着光纤链路在周期位置上进行配置，用以放大光信号。此外，OLT、OADM 和 OXC 本身可以含有光放大器，用以补偿损耗。到写作本书时为止，OLT 已被广泛采用，OADM 在较小的范围内使用，而 OXC 刚刚开始部署。

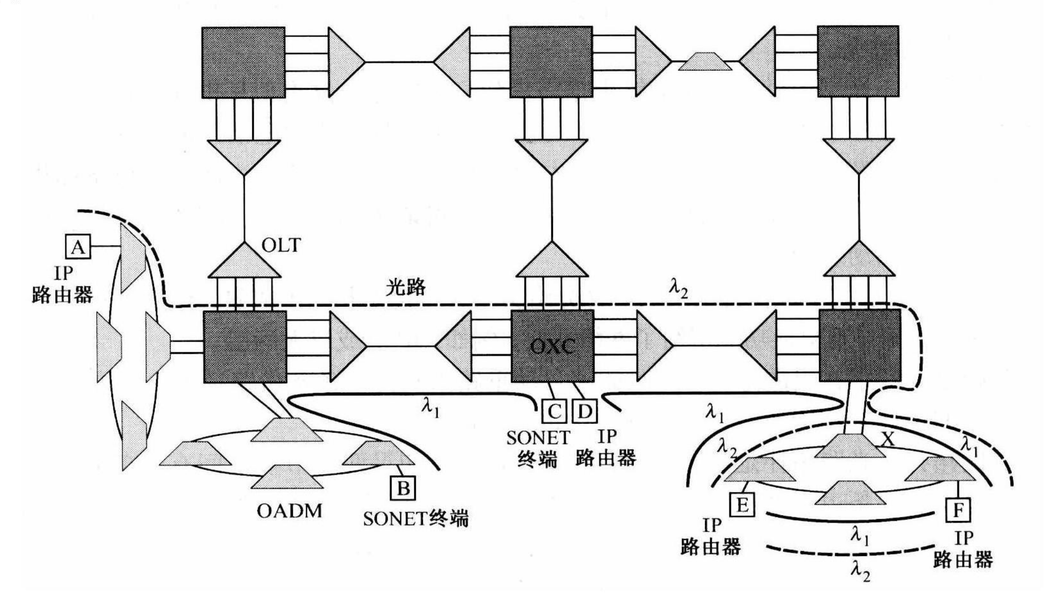


图 4.1　波长路由网状网络，其中显示了光线路终端(OLT)、光分插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)。网络给它的用户提供光路，如SONET机柜和IP路由器。一条光路在它的源节点和宿节点之间携有一个波长，但是沿着该光路这一个波长可能转换到另一个波长

该体系配置支持各种拓扑结构，包括环形拓扑和网状拓扑。OLT 将多个波长复用到单芯光纤中，同时也将复合的 WDM 信号解复用到各个波长。OLT 用在一条点到点链路的任一端。OADM 被用在这样一些位置上：在这些位置，部分波长需要在本地终接，而另一部分需要路由到其他目的地。它们通常配置在线性拓扑和环形拓扑结构中。OXC 执行类似的功能，

但是从其包含的端口数和波长数上看，它们具有大得多的规模，其配置在网状拓扑中，或者交叉连接多个环网。本章后面将详细研究这些网络组件。该网络的用户(或者客户)被连接到 OLT、OADM 和 OXC。这种网络支持各种客户类型，如 IP 路由器、以太网交换机及SONET 终端和 ADM。

每条链路都能够支持一定数量的波长。能够支持的波长数量依赖于在第 2 章中所研究的元器件和传输施加的限制。

接下来将描述这种体系结构的几个值得注意的特点。

波长重用。如图 4.1 所示，网络中多条光路能够使用同一波长，只要它们不在任何链路上重叠。这种空间重用能力允许网络利用有限数目的波长支持大量光路。

波长转换。光路可以沿着它们的路由进行波长转换。图 4.1 显示了这样一条光路，它在链路 EX 上使用波长λ_2，但在节点 X 处该波长被转换成波长λ_1，并在链路 XF 上使用该波长。波长转换能够提高网络中的波长利用率。这方面的问题将在4.4.1 节和第7 章中研究。也可能在网络的边缘处需要波长转换，以使网络外部来的信号变成适合网络内部使用的波长。

透明性。透明性是指光路能够在各种比特率和各种协议等情况下载荷数据，实际上能够实现对协议的不敏感。这就使得光层能够同时支持各种网络高层。例如，图 4.1 显示了在各对 SONET 终端之间，以及各对 IP 路由器之间的光路。这些光路能够载荷不同比特率和不同协议的数据。

电路交换。光层提供的光路能够根据需求建立和拆除。这类似于电路交换网中电路的建立和拆除，只可惜，建立和拆除时的速率可能比使用音频电路的电话网的速率低很多。事实上，当前这些光路一旦建立，将会在网络中保持数月到数年。随着当前网络设备提供的新业务和能力的到来，我们可能看到一种情况，即从光路请求到达和光路持续时间两方面来说，这一过程是更加动态的。

注意，在光层内不提供分组交换。光分组交换技术仍然相当不成熟，有关细节可见第9 章。实现所需的任何分组交换功能留给了网络高层，例如，IP 层或以太网层。

生存性。网络在出故障时，光路能够自动重路由到另一条备份路径上。这在网络中就提供了高度的弹性。这一问题将在第 6 章中进一步研究。

光路拓扑。光路拓扑是由网络节点组成的图形，如果两个节点之间有一条光路，则在两个节点之间有一条边。因此，光路拓扑是指由更高的层光层看到的拓扑。对于光层以上的 IP 网络，光路看起来像 IP 路由器之间的链路。可以定制设计一套光路，以满足高层的流量需求。这一课题将在第 7 章中进一步进行探讨。

4.1 光线路终端

从结构方面看，OLT 是相对简单的网络组件。它们处在点到点链路的任一端，用于复用和解复用波长信道。图 4.2 显示了 OLT 内的三个功能单元：波长转发器(transponder)、波长复用器(wavelength multiplexer)及可选择的光放大器(在图中没有显示)。波长转发器将光网络的客户传来的信号转换为适合光网络内部使用的信号。同样地，在相反方向上，它将来自光网络的信号转换为适合客户使用的信号。在客户和波长转发器之间的接口可以依据客户、

比特率，以及客户和波长转发器之间的距离和/或损耗改变。最普通的接口是在 3.1.5 节中描述过的 SONET/SDH 的短距离(SR)接口。在比特率 10 Gb/s 和更高的速率下，也有较便宜的甚短距离(VSR)接口。

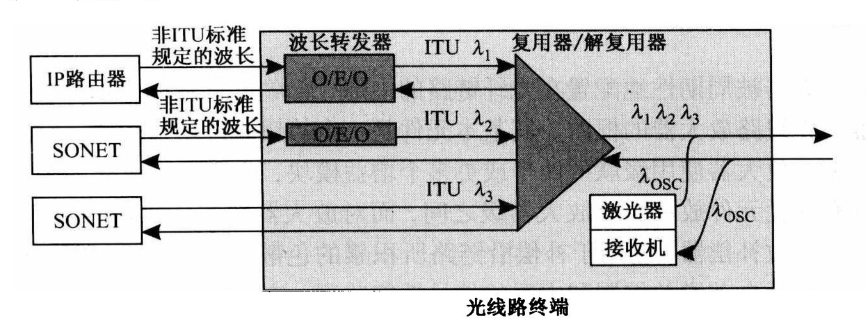


图 4.2　光线路终端框图。OLT 包含波长复用器和解复用器，以及称为波长转发器的自适应器件。波长转发器将来自客户的输入信号转换成适合在WDM链路上传输的信号，并且将来自WDM链路上的输入信号转换成适于送给客户的信号。如果客户设备能够直接发送和接收与WDM链路兼容的信号，则不需要波长转发器。OLT也终接了光纤链路上使用的一个分开的光监控信道(OSC)

自适应单元包含几项功能，在 5.6.3 节将对它们进行详细探讨。信号可能需要转换成适合在光网络内部使用的波长。由波长转发器产生的波长通常都符合国际电信联盟(ITU)制定的 1.55 μm 波长窗口的标准，而输入信号可能是 1.3 μm 的信号。为了网络管理的目的，波长转发器可能会增加额外的开销。也可能加入前向纠错码(FEC)，特别是对于 10 Gb/s 和更高速率的信号更需要 FEC。波长转发器通常也监测网络入口和出口处的信号比特率。由于这些原因，自适应单元的典型方案是通过光—电—光(O/E/O)转换实现。将来可能会看到一些全光波长转换技术，在 2.8 节的波长转发器中已经有过介绍；它们仍然处于实验室研究之中。

在某些情况下，可能自适应单元仅需用于输入方向来的信号，而在其他方向有满足 ITU 的波长直接送至客户设备。图 4.2 的中间部分显示了这种情况。在其他某些情况下，能够避免使用波长转发器，即利用光网络正在使用的客户设备内部已有的自适应功能来实现，如 SONET 网络组件。这是在图 4.2 的底部所示的情况。这样可以降低成本，并且成为一种更紧凑的、功率更有效的解决方案。然而，这种 WDM 接口是每个 WDM 销售商专有的，并且没有任何标准。(有关于这方面的更多内容可见 5.4 节。)通常情况下，波长转发器占据了 OLT 成本、占地面积和功耗的大部分，因而减少波长转发器的数量有助于所用设备成本的降低和体积的减小。

使用波长复用器可以将来自波长转发器的信号与其他不同波长的信号复用到一芯光纤中。在第 2 章中描述过的任一复用技术，如阵列波导光栅、介质薄膜滤波器或者光纤布拉格光栅等都能实现这种复用目的。此外，如果需要的话，光放大器可被用来增大信号功率。在另一方向上，在 WDM 信号被送入解复用器分出每个波长之前，如果需要的话，这些信号可再次被放大。这些波长信号再一次终接到在波长转发器(如果存在的话)或者直接终接到客户设备中。

最后，OLT 也终接了一条光监控信道(OSC)。该 OSC 信道由一单独的波长载荷，它与载

荷实际流量的所有波长不一样。它被用来监视沿着链路的各放大器的性能，以及用于将在第5章研究的其他管理功能。

4.2 光线路放大器

光线路放大器被周期性地配置在光纤链路的中部，通常间隔为80~120 km。图4.3是一个相当标准的光线路放大器的框图。其基本元件是一个掺铒光纤增益模块，它曾在第2章中研究过。典型的放大器使用级联的两个或更多个增益模块，这一方法被称为中间级接入。这一功能允许有损耗元件放在两个放大器级之间，而对放大器的整体噪声系数没有重大影响。这些元件包括色散补偿器，它用于补偿沿链路所积累的色散，也包括OADM，它将在下面讨论。放大器也包括自动增益控制和内置的信号性能监测，该课题将在第5章中讨论。

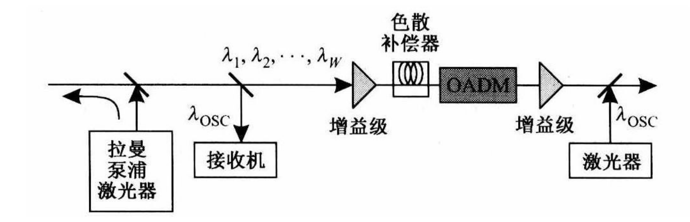


图4.3 一个典型的光线路放大器的结构框图。图中只表示了一个方向。放大器使用了多个掺铒增益级，并且在各增益级之间有选择地配置了色散补偿器和OADM。一个拉曼泵浦可以用来在光纤段上提供附加的拉曼增益。OSC信道在输入处被滤波器选出并终接于接收机，而在输出端又被添入回光纤

光纤链路中也可以使用拉曼放大器，其中每一个放大器使用一个高功率泵浦激光器，在与信号相反的方向上泵浦光纤。在输入处光监控信道被滤出，并被终接到接收机，而在输出处再添加入光纤。在使用C波段和L波段的系统中，在放大器的输入处将不同波带分开，并对每个波带分别使用放大器。

4.3 光分插复用器

光分插复用器(OADM)提供了一种经济上合算的方法去处理城域网和长距离网络中通过的流量。OADM可以在长距离网络中放置在放大器的位置上，但也可以用做单独的网络组件，特别是在城域网中。为了理解OADM的好处，考虑图4.4所示的3个节点，例如，A、B和C之间的网络，在节点A、B和C处都放置了路由器。这一网络支持A和B、B和C及A和C之间的流量。基于这一网络拓扑，在A和C之间的流量通过节点B。为了简化，将假定链路是全双工的，连接也是全双工的。这是当前大多数网络的情况。因此，图4.4中的网络实际上包含一对光纤，用以传输两个相反方向的流量。

假设流量需求如下：A和B之间用一个波长，B和C之间用一个波长，而A和C之间有三个波长。现在假设A和B之间配置了点到点WDM系统，以支持这一流量要求。这样的解决方案如图4.4(a)所示。配置了两套点到点的系统，一套在A和B之间，另一套在B和C之间。正如较早在4.1节中看到的，每个点到点系统在链路的每个端使用一个OLT。OLT包含复用器、解复用器和波长转发器。这些波长转发器构成系统成本的主要部分。

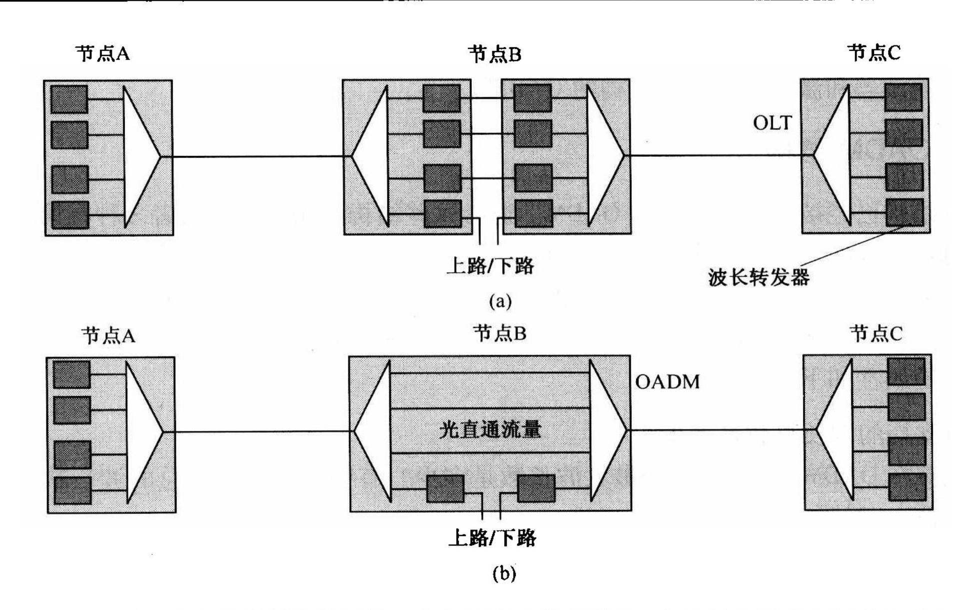


图4.4 表示光分插复用器作用的三节点线形网络的例子。在节点A和C之间需要三个波长，在节点A和B之间和节点B和C之间各需要一个波长：(a)使用点到点WDM系统的一种解决方案；(b)在节点B处使用光分插复用器的一种解决方案

考虑节点B的需求。节点B有2个OLT。每个OLT终接4个波长，因而需要4个波长转发器。然而，这4个波长中只有1个波长被指定用于节点B。其余波长转发器被用来支持节点A和C之间的直通流量。这些波长转发器背到背地相互连接，以实现这一功能。因而，在节点B处的8个波长转发器中的6个波长被用来处理直通流量——这是一个很昂贵的方案。

考虑图4.4(b)所示的一种OADM解决方案。现在用一个波长路由网络代替原来的点到点WDM系统。在这一网络中，在节点A和C处使用一个OLT，在节点B处使用一个OADM。OADM将4个波长中的1个下路，然后终接到波长转发器。其余3个波长利用相当简单的光滤波技术直通过节点，不需终接到波长转发器。最终，在节点B只需要2个波长转发器，代替了图4.4(a)解决方案中所需的8个波长转发器，这样就大大降低了成本。在7.1节，有关节省成本的问题将详细探讨。

在典型的运营商网络中，不需要终接，而是将部分流量直通过节点，这在许多网络中都是非常普遍的。因此，OADM在以一种高成本效益的方式将流量直通过节点中起了至关重要的作用。

回到上面的例子，读者也许会问：为什么在图4.4(a)的解决方案中需要波长转发器处理直通的流量？换言之，为什么不能简单地除去波长转发器，将节点B处的两个OLT之间的WDM复用器和解复用器直接连接起来，如图4.4(b)所示，而不是设计一个单独的OADM？确实，如果将那些OLT设计成支持这样的容量，这是可能的。网络物理层的工程设计比点到点系统复杂得多。例如，在一个简单的点到点系统的设计中，从节点A传输至节点B的信号功率可能非常低，以至于它不能再经过一跳，传输到节点C。同样，网络中在节点处上路的信号的功率，在理想情况下必须等于直通信号的功率。当然，也有较简单的、较便宜的方法构建OADM，这将在4.3.1节中讨论。

在下一节中会看到，当前的OADM是相当不灵活的。它们大部分元件是固定的，不可能

在不中断业务的情况下由软件选择哪一条信道是下路还是直通。在4.3.2节中，将看到如何用可调谐滤波器和激光器构建可重构的OADM。

4.3.1 OADM结构

几种结构已经被建议用来构建OADM。通常这些结构使用了一种或者多种在第2章中讨论过的复用器或滤波器。大多数实际的OADM既使用光纤布拉格光栅、介质薄膜滤波器，也使用阵列波导光栅。这里，把OADM看做是一个黑盒子，它带有两个线路端口，用以携带成套波长，还带有许多本地端口，每个端口用以下路和上路某个特定的波长。需要探讨的OADM关键属性如下。

- 可支持的波长总数是多少？
- 能够在OADM处上/下路的最大波长数是多少？有些结构只允许总的波长数的一个子集被上/下路。
- 一些特定的波长上/下路时是否存在约束？某些结构只允许一定系列的波长，而不是任一波长上/下路。这一能力包括从只能上/下路单一波长到一组波长，直到任意一个波长。正如下面将要看到的，该点对流量在网络中如何路由具有重要的影响。
- 如何容易上/下路一些额外的信道？为了上/下路一个附加信道，是否必须产生业务碰撞(即干扰现有信道)？这是某些结构下的情况，而不是其他结构时的情况。
- 从成本正比于下路的信道数这一意义上看，结构是否是标准模块化的？对于业务提供商来说这是重要的，因为他们宁愿随着业务发展而逐渐投资，而不愿支付高的初期成本。换言之，业务提供商通常在网络建设的开始使用少量信道，随着流量需求的增加再增添附加的信道。
- 对于OADM来说，物理层(传输)路径设计的复杂性是什么？增添新的信道或节点将如何影响到该项设计？从根本上说，如果从信道看来总的直通损耗与上/下路的信道数无关，则上/下附加信道能够在对现有信道影响最小的条件下实现。(但是，像串扰等其他障碍仍然必须考虑进去。)这是一个重要的设计方面的问题，我们将密切关注。
- 从被选择的信道能够在遥控软件的控制下上/下路或直通这一意义上，OADM是否是可重构的？这对尽量减少人工干预来说是一个可取的特点。例如，由于某一节点处的流量增大，需要在那个节点处下路一条附加的信道，则在遥控软件控制下而不是送一个工作人员到那个位置就可以很简单地做到这一点。这个问题将在4.3.2节中讨论。

图4.5显示了3种不同的OADM结构，表4.1中比较了它们的主要属性。也可能比较几种其他变体，一些变体将在习题4.1中探讨。

在并联结构[见图4.5(a)]中，所有输入信道都被解复用。某些被解复用的信道能够在本地下路，其他信道将直通。信道的任意一个子集能够被下路，其余的直通。所以，对什么信道能够上/下路方面没有限制。因此，这种结构对规划网络中的光路方面只有最少的限制。此外，通过OADM的损耗是固定的，与多少信道上/下路无关。所以，如果采取适当的设计来处理其他传输损伤，那么上/下路附加信道不影响现有信道。遗憾的是，为了处理少量的下路信道，这种结构是不划算的，因为不管多少信道下路，所有信道都需要解复用，然后再

复用到一起。因而，需要为所有信道所需的全部解复用和复用付出成本，甚至当只需下路一个信道时也是一样。这也使通过 OADM 时损耗较高。然而，如果大部分信道需要下路，或者如果在上/下路任一信道时，希望得到完全的灵活性，这种结构就变得合理了。这种结构的其他影响是由于所有信道完全在 OADM 中解复用和复用，每条光路在到达目的地之前经历了许多滤波器。因而，对复用器和激光器的波长容限可能是很严格的。

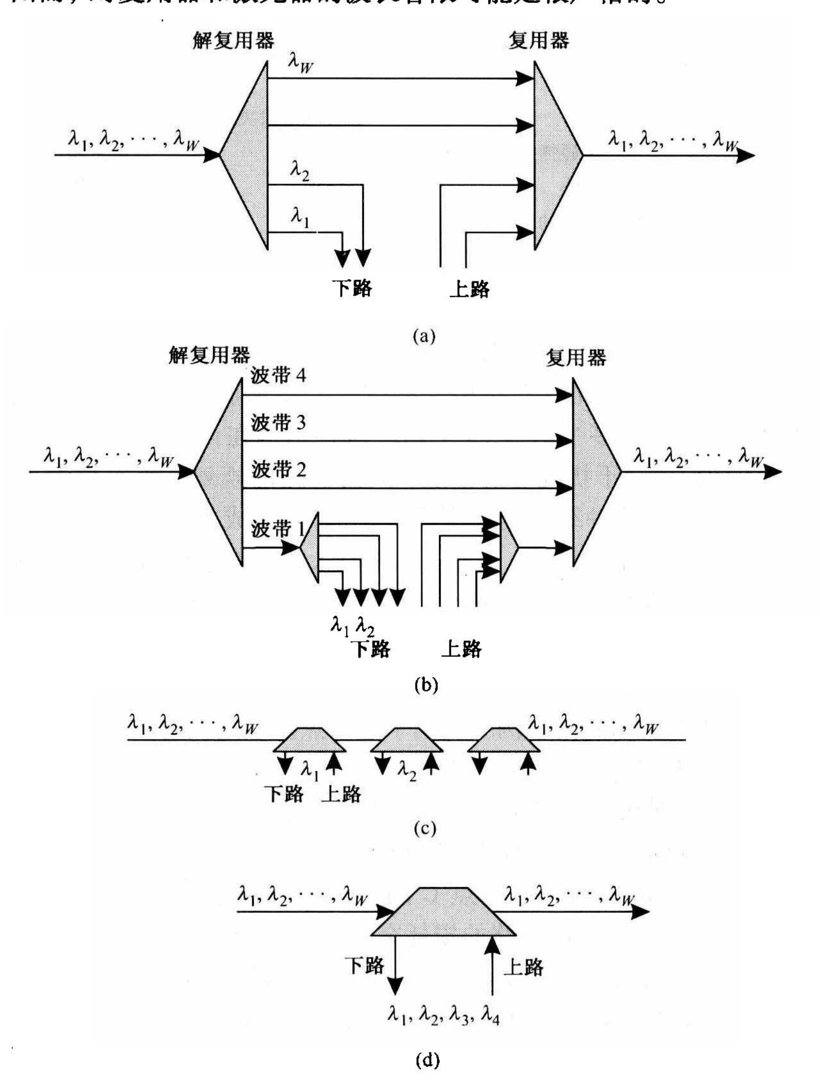


图 4.5　不同的 OADM 结构。(a) 并联型，其中所有波长都被分离，然后再复用回去；(b)并联结构的模块化版本；(c)串联型，其中部分波长被分离，但一次上路一个波长；(d)波带下路，其中一个波带的波长一起上/下路，W表示波长总数

采用如图 4.5(b)所示那样的模块化结构可以使成本得到某些改善。其中，复用和解复用分两级进行。第一级解复用将所有波长分离进波带，第二级将波带分离成单个信道。例如，一个 16 信道的系统可以使用 4 个波带，每个波带具有 4 个信道。如果仅有 4 个信道需要在某个位置下路，其余 12 个信道就能够在波带级直接通过，而不需将它们解复用到单个信

道。除了在实现复用器和解复用器方面节省了成本外，波带的使用使得信号以低的光损耗和较好的损耗一致性通过器件。几种商用的 OADM 使用了这一方法。进而，当信道数变得很大时，采用模块化的多级复用方法(见 2.3.10 节)变得至关重要。并联 OADM 的典型实现方法是使用介质薄膜滤波器和阵列波导光栅，更多信道数时可以使用间插型滤波器。

表 4.1 不同 OADM 结构的比较。*W* 是信道总数，*D* 表示能够被单个 OADM 下路的最大信道数

属　性	并 联 型	串 联 型	波 带 下 路
D	$=W$	1	$\ll W$
信道限制	无	在计划阶段决定信道	固定一组信道
流量改变	无碰撞	需要碰撞	部分碰撞
波长规划	最小	所需的	高度限制的
损耗	固定的	可变的	固定到 D
成本(小下路信道数)	高	低	中等
成本(大下路信道数)	低	高	中等

在串联结构中[见图 4.5(c)]，从输入的一组信道中下路和上路某一信道，称该器件为单信道 OADM(SC-OADM)。用光纤布拉格光栅或者介质薄膜滤波器都可以实现这些结构。几个 SC-OADM 级联就能实现多个信道上/下路。这种结构在许多方面补充了上述的并联结构。由于上/下路附加信道会干扰现有的信道，因而需提前规划在每个位置处，什么波长组需要下路，以使干扰最小。这种结构是高度模块化的，因而成本正比于下路的信道数。只有在下路信道数较少时，成本才是低的。不过，如果有大量的信道数需要下路，成本将非常高，因为必须级联许多单个的器件。也有对成本具有间接影响的因素，因为当更多的信道下路时损耗会增加，这就需要使用额外的放大。

下路信道数越多，损耗就随之增加，这是在采用串联 OADM 的网络中使网络配置复杂性增加的主要因素。图 4.6 所示的简单例子说明了这一点。假定发射机和接收机之间的光路可允许的链路预算是 25 dB。考虑在节点 B 到节点 D 之间配置一条光路，它的发射机和接收机之间的损耗接近 25 dB。现在考虑需要用不同的波长支持从节点 A 到节点 C 之间建立一条新的光路。为了支持这条光路，在节点 C(以及节点 A)处必须配置一个附加的 SC-OADM 来下路这条新的光路。这一 OADM 在通过节点 C 的信道中引进了附加的损耗，如 3 dB。这个 OADM 的引入使节点 B 到节点 D 的光路的损耗突然增加到 28 dB，以至于使得这一光路不能工作。然而，问题还没有到此为止！假定为了解决这一问题，决定在节点 C 对该光路进行再生，而为了进行再生，需要在节点 C 先将它下路，让它通过一个再生器，然后再将它上路。这就需要在节点 C 再附加一个 SC-OADM，这一器件在通过节点 C 的信道上又引入了 3 dB 的附加损耗。接着，就又可能干扰通过节点 C 的其他光路。因而，上/下路附加信道可能会在网络中对所有其他光路产生连锁反应。使用光放大器，再结合仔细的链路工程设计，能够减小这些问题中的一些影响。例如，在引入光放大器后，可以将一个定量的损耗分配到放大器的前面。可以添加 SC-OADM，直到满足损耗预算，此后能够添加另一个放大器。

注意，直通信道不经受任何滤波。结果每一条光路只经过两个滤波器：一个在源节点，一个在宿节点。与并联结构相比较，复用器和激光器对波长的容忍性要求不太严格。

在波带下路的结构[见图 4.5(d)]中，固定的一组信道从总的信道中上/下路。下路的那些信道通常继续通过下一级解复用，从而使这些信道分开。上路的那些信道通常用一个简单

的耦合器进行合波，并且加入直通的信道。例如，通常可用一个波带滤波器从 32 路信道中实现下路 4 路相邻的信道。

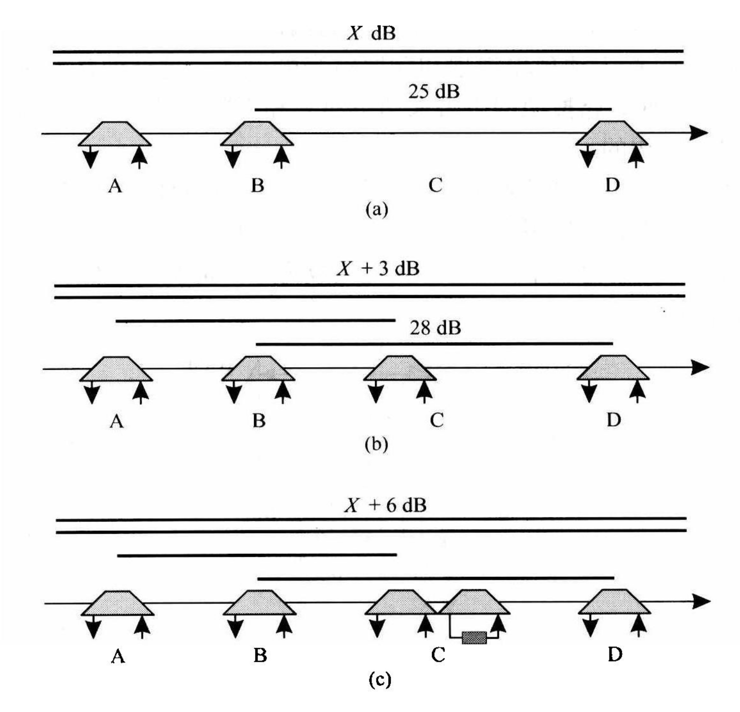


图 4.6　流量变化对使用串联 OADM 的网络的影响。(a) 初始状态；(b) 在节点 A 和节点C之间加入一条新的光路，导致光路BD瘫痪；(c)在节点C处加入一个再生器，使光路BD再生。然而，这将使流过节点C的其他光路受到影响

这种结构试图在并联结构和串联结构之间做出妥协。能够下路的最大信道数由所用的波带滤波器的类型决定。在这一组信道内部，上/下路附加信道不影响网络中的其他光路，因为不在这一组的其他所有信道的直通损耗都是固定的。

这种结构的确使网络中的波长规划复杂化，并且在波长分配上加了一些约束，因为在每一位置都下路同一套的波长。例如，如果波长λ_1在某个节点上路并在下一节点下路，那么，与λ_1同一频带内的其他波长，如λ_2、λ_3、λ_4，也将在同一节点上路并也在下一节点下路。使得这一点不是如此理想的原因是，一旦一个波长作为频带的一部分下路，在它能够上路回到网络中之前可能需要再生。所以，在这一例子中，波长λ_2、λ_3、λ_4需要在这两个节点再生，甚至它们只是直通过节点。设计链路预算使这些波长的光信号在没有再生的情况下直通过节点是很困难的。但如果使用各种不同的 OADM，使每一个 OADM 下路不同组的信道，这样就能够解决这一问题。读者可以很容易想象，这会使网络规划复杂化。如果波长下路能够提前规划，并且网络保持静态，那么这一方案可能是一种可行的选择。然而，如果网络中流量是随着时间变化的，则这种情况可能不容易规划。

前面讨论过的结构是基于当前技术可行的结构，所有这些现在已在商业上实现。很清楚，它们中没有一个是完善的解决方案，以满足全方位的应用。串联和波带下路结构具有低的启动成本，但由于处理网络中流量变化时缺乏灵活性，已经使它们的应用受到阻碍。

4.3.2 可重构 OADM

对于 OADM 来说，可重构性是一种非常理想的属性。可重构性是指选择所期望的波长不间断地上/下路的能力，而无须预先规划和配置适当的设备。这就使运营商在规划他们的网络时具有灵活性，并能使光路按照网络需求动态建立和拆除。从这一意义上说，在图 4.5 中所考虑的结构不是可重构的。

图 4.7 和图 4.8 示意了一些不同的、可重构的 OADM(ROADM)结构。图 4.7(a)提出了一种变化的并联结构方案，它使用光开关来上/下路所需的特定波长。图 4.7(b)表明了一种变化的串联结构方案，其中每一个 SC-OADM 现在成为一个可调谐器件，它既能上/下路一个特定波长，也可以让它直接通过。

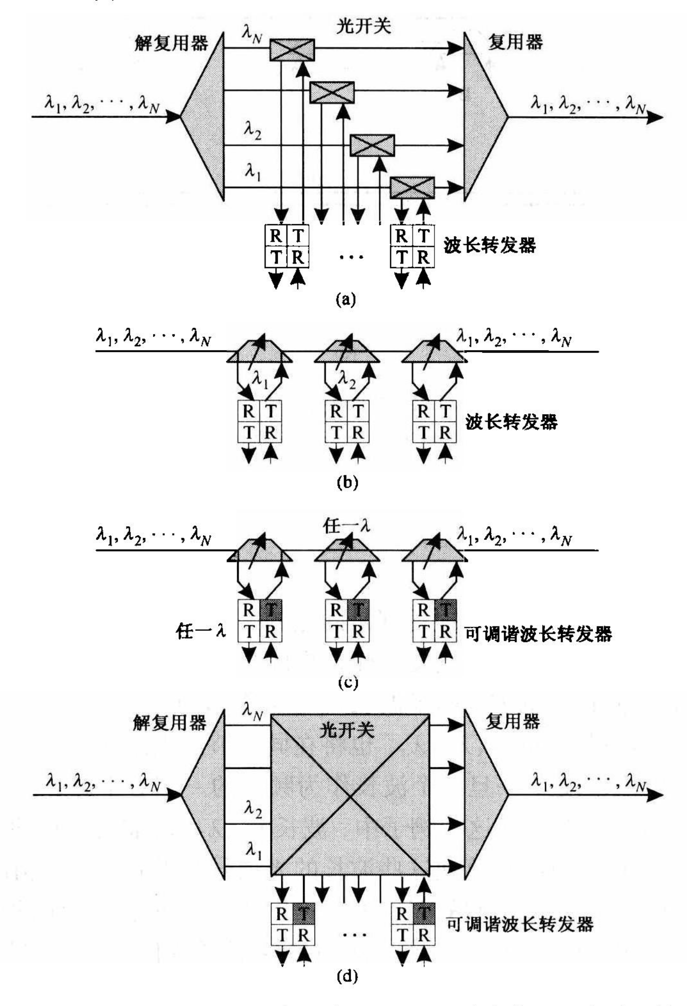


图 4.7 可重构 OADM 的结构。(a)使用带有光上/下路交换和固定波长转发器的、部分可调谐的并联结构OADM;(b)使用带有固定波长转发器的、部分可调谐的串联结构OADM;(c)使用带有可调谐波长转发器的、完全可调谐的串联结构OADM;(d)使用带有可调谐波长转发器的、完全可调谐的并联结构OADM

这两种结构只是部分处理了可重构问题，因为仍然需要波长转发器给光层提供适配。要区分两种类型的波长转发器：固定的波长转发器和可调谐的波长转发器。固定的波长转发器能够发送和接收一个特定的固定波长。这是当今大多数波长转发器的情况。另一方面，能够将可调谐的波长转发器设置在任一所需波长发送和接收任一所需波长。可调谐的波长转发器使用一个可调谐 WDM 激光器和宽带接收机，能够接收任何波长。

为了使用如图 4.7(a)和(b)所示的、带有固定波长转发器的可重构 OADM(ROADM)，需要提前配置这种波长转发器，以便它们在需要时可用。这就导致了两个问题：首先它是昂贵的，配置一个波长转发器并且不使用，而相关的 OADM 只是让那个波长直通经过。但是假设这一成本能够与快速建立和断开光路所增加的价值相互抵消。第二个问题是，虽然 OADM 是可重构的，但是波长转发器不是。所以，仍然需要提前决定所需配置的波长转发器适用于哪一组的波长，这就使得网络规划更加受到限制。

为了避免这些问题，就需要使用可调谐的波长转发器，甚至使用比图 4.7(a)和(b)所示的更加灵活的结构。例如，图 4.7(c)表示了一种串联结构，它具有完全的可重构性。每一个可调谐 SC-OADM 都有能力上路/下路任一单路波长，而不是某一固定波长，并让其他波长通过。采用可调谐波长转发器便使该种结构具有了适应性。这就提供了一个完全可重构 OADM。类似地，图 4.7(d)表示了一个具有完全可重构性的并联结构 OADM。注意，这种结构需要采用大规模光开关。这正是下面将研究的光交叉互连。

图 4.8(a)显示了一种广播选择 ROADM。输入的光信号通过无源光耦合器广播，使得部分信号下路，另一部分被发送到直通路径。下路路径通往解复用器或者无源分束器和本地接收机。在直通路径中有一个波长阻断器(wavelength blocker)，它是一个可重构器件，可以选择阻断或者直通各个波长。

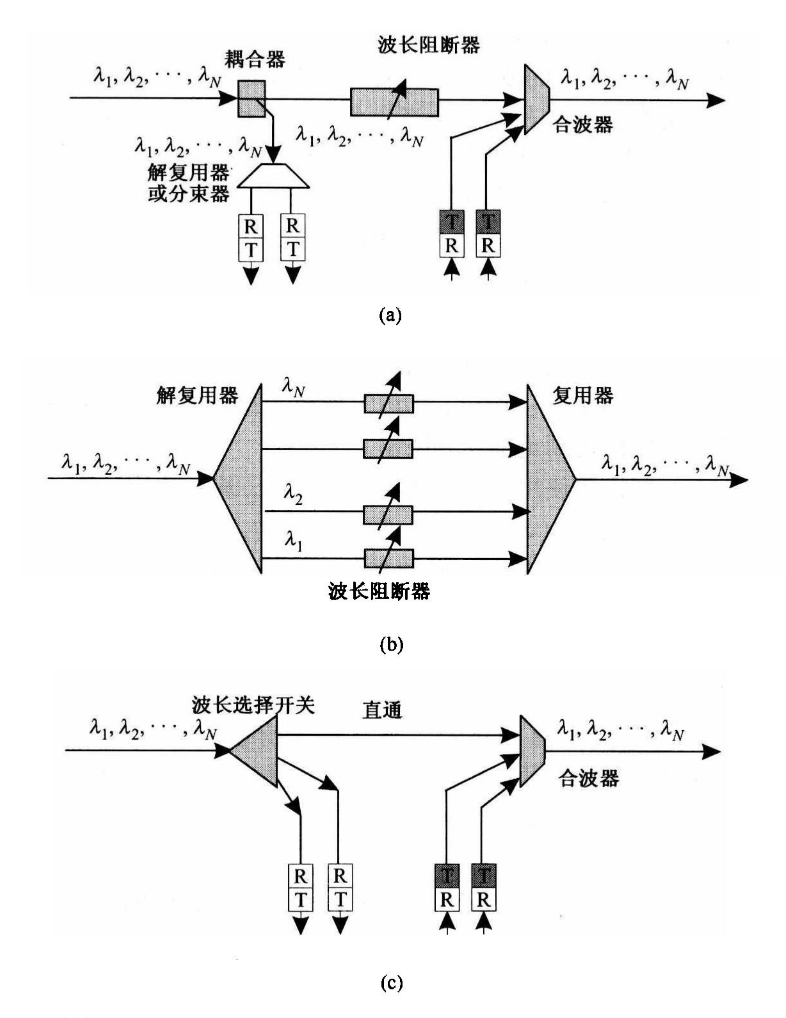
在 ROADM 的直通路径上，在 ROADM 处下路的波长被波长阻断器阻断，以至于它们不能到达输出端。来自 ROADM 的本地可调谐发射机的波长，通过一个合波器(也即无源光耦合器)上路到 ROADM 的输出端。

图 4.8(b)表明了波长阻断器的工作原理。输入的光信号被解复用到各个波长，进入各个波长阻断器，然后从阻断器来的信号在输出处合波。阻断器类似于可变光衰减器(VOA)，只是它们被控制，以决定波长通过或不通过。

图 4.8(c)所示的是一个使用 $1 \times N$ 波长选择开关(wavelength selective switch, WSS)而实现的 ROADM。WSS 能够将它输入的波长单独交换到其输出端。(注意，波长阻断器有时被看成是一个 1×1 的 WSS。)

这个 $1 \times N$ 的 WSS 被连接到 ROADM 的输入端，让 WSS 的输出之一直通到达 ROADM 的输出端。而 WSS 的另外 $N-1$ 个输出被用来在本地下路波长。这些输出有时被称为无色的，因为它们能够携带任一波长。如图 4.8(c)所示，可以使用一个合波器，如一个光耦合器，或者使用一个 $N \times 1$ 的 WSS，将这个 ROADM 的本地可调谐发射机的波长上路到 ROADM 的输出端。

到目前为止，所讨论的 ROADM 可适用于有两芯输入光纤链路的节点(即环形网的节点)。接入到节点的输入光纤链路数量称为该节点的度(degree)，所以在这种情况下，节点的度为 2。在网状网和相互连接的环网拓扑的情况下，节点的度更高。4.4 节中所讨论的光交叉连接可以用于这些节点。基本上，它们都是图 4.7(d)结构的扩展。然而，它们的前期成本高。另一种较便宜点的结构是多度(multidegree)ROADM，这是 ROADM 结构的扩展。



(a)

(b)

(c)

图4.8 (a)广播选择ROADM;(b)波长阻断器;(c)基于波长选择开关(WSS)的ROADM

图4.9显示了两个度数为3的多度ROADM,它们使用了广播选择技术和WSS技术。在图4.9(a)中,从输入光纤来的信号通过光分束器广播输出。分束器的输出被下路到ROADM的本地可调谐波长转发器的接收机,以及直通到一级$N \times 1$ WSS,其中N是多度ROADM的输出端口数。WSS的输出接到输出光纤。本地波长转发器的可调谐发射机通过光纤的$N \times 1$ WSS被连接到输出光纤。发射机的信号首先通过合波器,然后到达WSS的输入端。

这种多度ROADM没有如图4.7(d)所示的结构那样灵活。它的发射机和接收机都是固定连接到特定的光纤链路端口。例如,发射机固定连接于一条输出光纤,而不能用于另一条输出光纤。图4.9(b)所示的例子在一定程度上缓解了这一问题。现在的WSS可以动态配置,可以让本地可调谐波长转发器将它们的波长交换到任一光纤链路。

用$1 \times N$的WSS替换功率分束器,就能够修改图4.9中两个例子的结构。对于这些设计及图4.8中的设计,采用WSS而不是采用光分束器或耦合器,就有改善功率损耗的优点。但有一个缺点,就是WSS的价格很高。还需注意,ROADM可能仍然需要将光放大器放置在器件之间,以补偿功率损耗。

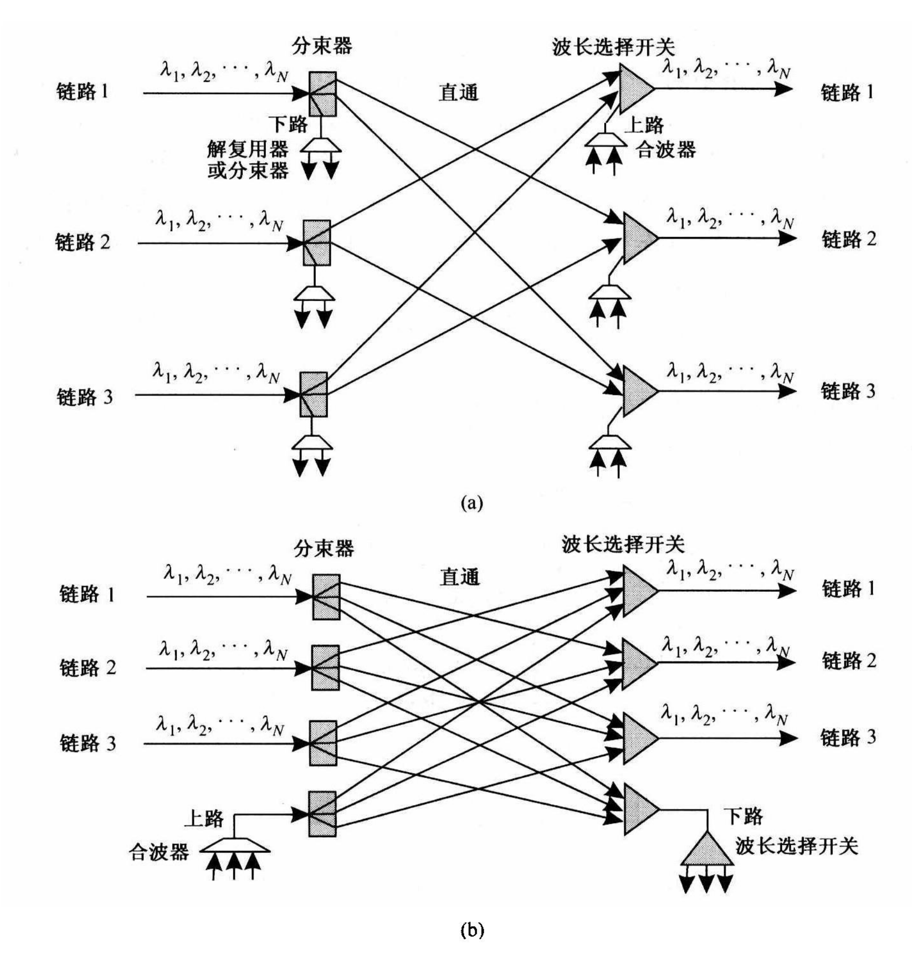


图4.9　广播选择多度ROADM，其中对于接收机和发射机，(a)固定在特定的光纤链路上；(b)能够用于任一光纤链路

因此，一个理想的OADM看起来像什么？对于这样的OADM，(1)应该具有构建下路最大数量信道的能力；(2)应该允许用户在远程软件的控制下，包括使用波长转发器来选择哪些特定信道下路/上路，以及哪些信道需要直通，而不影响现有信道的运行；(3)应该不需要用户预先规划哪个信道可能需要在一个特定节点下路；(4)应该维持低的固定损耗，不管多少信道被下路/上路，以及多少信道直通。

4.4　光交叉互连

OADM是有用的网络组件，用以处理简单的网络拓扑，如图4.4所示的线形拓扑或环形拓扑，以及相对适度的波长数。还需要一个网络组件来处理更复杂的网状拓扑和大量的波长数，特别是在网络中心枢纽位置，处理大量的流量。这一组件就是光交叉互连(OXC)。虽然使用了术语“光”，但OXC可以在内部既使用全光的也使用电的开关矩阵。OXC也是可重构光网络的关键网络组件，在这一网络中，光路可以按照需要建立和拆除，不必进行静态配置。

考虑一个大型运营商的中心枢纽。它可以是在大城市中提供本地业务的中心局，也可能是长距离业务提供商网络中的一个大型节点。这样的一个中心局可以终接几条光纤链路，每一条链路携带大量的波长。这些大量的波长中，有许多波长可能不需要终接在这个中心局，而是想直通过中心局去往另一个节点。图 4.10 所示的 OXC 就能实现这一功能。如图 4.10 所示，OXC 与 SONET/SDH 网络组件，以及 IP 路由器、WDM 终端和分插复用器一起工作。通常情况下，一些 OXC 端口连接到 WDM 设备，而其他 OXC 端口连接到终端设备，如 SONET/SDH ADM、IP 路由器或 ATM 交换机等。因此，OXC 能够为快速流量提供高成本效益的直通功能，而不终止在中心枢纽局，以及从连接的设备中收集流量到网络中。某些人认为，OXC 是一个将交叉互连开关与周围的 OLT 组合在一起的设备。然而，我们定义的 OXC 不包括周围的 OLT 设备，因为运营商将交叉互连设备与 OLT 看做两个单独的产品，并且常常从不同的供应商购买 OXC 和 OLT。

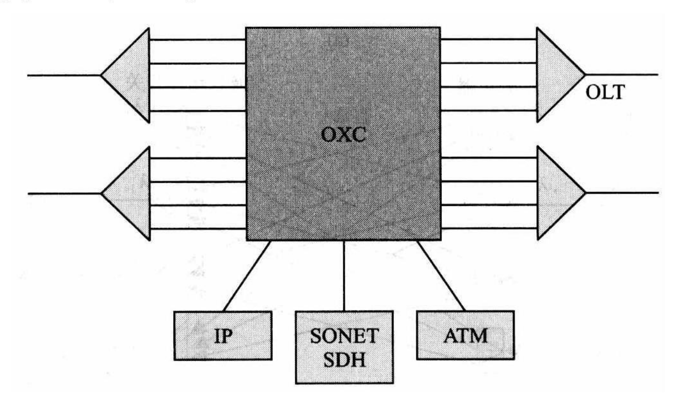


图 4.10 网络中使用的 OXC。该 OXC 处于光层的客户设备和光层的 OLT 之间

大型网络中的 OXC 提供以下几项关键功能。

提供服务。OXC 能够被用来在大型网络中以自动的方式提供光路，不需要求助于手动配线架进行连接。当节点中有大量波长或网络中有大量节点时，这种能力变得非常重要。当网络中的光路需要重构以适应流量变化时，这种能力也显得非常重要。派人去每个中心局进行人工操作以实现配线架连接是昂贵的，并容易出错。远程可重构的 OXC 可维护这一功能。

保护。网络中的光纤断裂和设备故障时，保护光路正在成为交叉互连设备所期望的最重要的功能之一。交叉互连设备是一个智能网络单元，它能够检测网络中的故障，并且在围绕故障点快速重路由光路。交叉互连设备使真正的网状网络能够被配置。与第 3 章中讨论的 SONET/SDH 环网比较，这些网状网络能够特别有效地利用网络带宽。这一课题将在第 6 章中详细讨论。

比特率透明。能在任意比特率和制式下交换信号是期望 OXC 应该具有的属性。

性能监测、测试接入和故障定位。OXC 提供中间节点处信号的性能参量的可见性。它们通常允许测试设备挂接到一个专用的测试端口，以非插入方式监测通过 OXC 的信号。非插入测试接口需要桥接输入信号。在桥接光路中，输入信号被分成两部分。一部分被送到核心节点，另一部分可用在测试接入端口处。OXC 也提供环回能力。该能力允许光路在中间节点处被环回，以达到诊断的目的。

波长转换。除了将一个端口来的信号交换到另一个端口外，OXC 也可能有波长转换能力。

复用和梳理。通常，OXC 以光线路速率处理输入和输出信号。然而，它们能够结合复用和梳理能力，使得在内部以更细的粒度[如在 STS-1(51 Mb/s)下]交换流量。请注意，这种时分复用必须在电域进行，并且是真正的 SONET/SDH 复用，但是它要纳入到 OXC 中进行，而不能在分开的 SONET/SDH 机架中进行。

在功能上，OXC 能够被分成交换核心和端口综合体。开关放置在交换核心中，执行实际的交叉连接功能。端口卡放置在端口综合体中，它们用做与其他设备的通信接口。这些端口的接口可能包括，也可能不包括光-电(O/E)或光-电-光(O/E/O)转换器。

图 4.11 显示了不同类型的 OXC，以及节点内 OXC 与 OLT 或 OADM 互连的不同配置。至于是否在电域或光域进行交换，是否使用 O/E 和 O/E/O 转换器，以及 OXC 如何与外围设备互连等，都会使这些方案有所不同。表 4.2 总结了这些结构之间的主要区别。

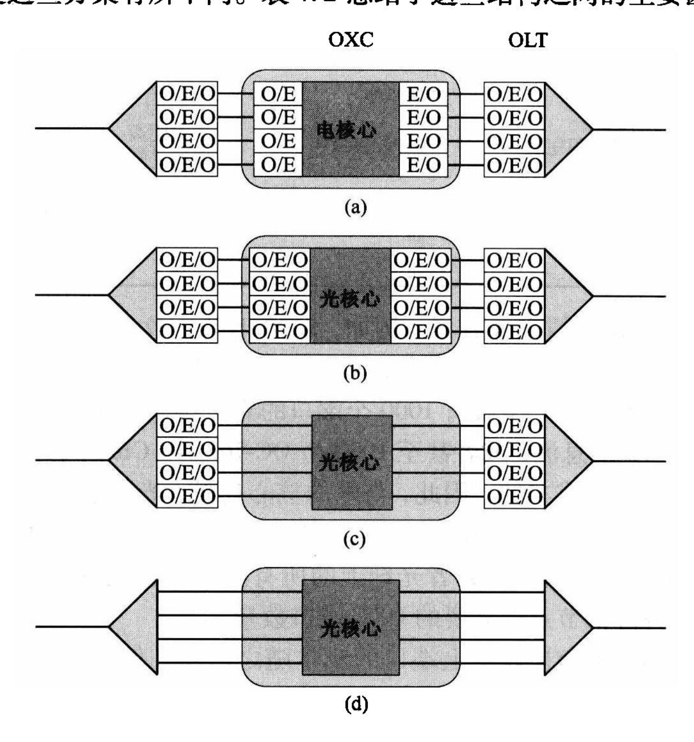


图 4.11　OXC 配置的不同方案。(a) 电交换核心；(b) 前后配置 O/E/O 转换器的光交换核心；(c)直接连接到WDM设备中波长转发器的光交换核心；(d)直接连接到OLT中复用器/解复用器的光交换核心。图中OXC的任一端只显示了一个OLT，虽然实际上一个OXC会连接多个OLT

图 4.11 中的头三种配置是不透明的配置，因为光信号通过节点时被转换成电信号。最后一种配置[见图 4.11(d)]是一种全光配置——当信号通过节点时，它保持在光域。

在图 4.11 观察到的不透明的配置中，交换核心可以是电的，也可以是光的，即信号既可以在电域，也可以在光域进行交换。电交换核心能够梳理细粒度的流量，通常包括较低速率的电路时分复用进到输入和输出端口处的线路速率。现在有在 STS-1(51 Mb/s)或 STS-48(2.5 Gb/s)粒度下交换信号的电核心 OXC。与此相反，一个真实的光交换核心不会提供任何梳理功能。它只能简单地将一个端口来的信号交换到另一个端口。

表4.2 各种OXC配置的比较。某些配置使用了光到电转换作为交叉互连的一部分,在这一情况中,它们能够测量电层参量,如误码率(BER),并基于这一测量请求网络恢复。对于头两种配置,在OLT上的典型接口是SONET短程(SR)或甚短程(VSR)接口。对于不透明光配置,它是一个中等距离(IR)或是一个甚短距离(VSR)专用接口。基于线路速率为OC-192的商用设备的特性进行了成本、功率和占用空间的比较

属　性	不透明电配置 [见图4.11(a)]	带有O/E/O的不透明光学配置 [见图4.11(b)]	不透明光配置 [见图4.11(c)]	全光配置 [见图4.11(d)]
低速梳理	有	无	无	无
交换容量	低	高	高	最高
波长转换	有	有	有	无
交换触发器	误码率	误码率	光功率	光功率
OLT上的接口	短程/很短程	短程/很短程	中等距离/串行甚短距离	专用的
每端口成本	中等	高	中等	低
功率消耗	高	高	中等	低
占用空间	高	高	中等	低

电交换核心是设计其总的交换容量,例如,1.28 Tb/s。这一容量能够被用来交换,例如,多达512个OC-48(2.5 Gb/s)的信号,或者128个OC-192(10 Gb/s)的信号。通常,光核心是与比特率无关的。因而,一个具有1000个端口的光交换核心能够交换1000个OC-48的信息流、1000个OC-192信息流,或者甚至1000个OC-768(40 Gb/s)的信息流。对于所有这些情况,每个端口都是同一成本的。因此,与电的核心比较,光核心的容量可以得到更多地扩展,这就使得它在将来比特率升高时更面向未来。特别是图4.11(d)的配置,允许我们在单一OXC端口上一起交换一群波长或者光纤上的所有波长。这使得这种配置能够有处理巨大容量的整体能力,并降低节点处需要的OXC端口数量。

随着比特率的增加,电交换设备上端口的成本随之增加。例如,一个OC-192的端口的成本可能是OC-48端口成本的两倍。然而,在光核心交换设备中,端口的成本是一样的,与比特率无关。因而,在高比特率下,通过光核心OXC交换信号比电核心OXC在成本上将更具成本效益。

光交换核心也是透明的,它不考虑交换的是10 Gb/s以太网信号,还是10 Gb/s SONET信号。相反,电交换核心对于每一种接口类型需要单独的端口卡,用于将输入信号转换成适合交换矩阵的格式。

图4.11(a)显示了包含电交换核心的OXC,该核心两端配置了一些O/E转换器。OXC通过短程(SR)或甚短程(VSR)接口与OLT相互配合工作。OLT带有波长转发器,它们将信号转换成合适的WDM波长。另一种情况是OXC本身可以具有规定波长的激光器,它们可以与OLT一起工作,不需要在它们之间使用波长转发器。

图4.11(b)~(d)显示了带有光交换核心的OXC。这些图之间的差别在于它们如何与WDM设备之间相互配合工作。在图4.11(b)中互操作的实现有些类似于图4.11(a)的方式——通过在OXC和OLT之间的短程和甚短程接口中使用O/E/O转换器。在图4.11(c)

中，没有 O/E/O 转换器，光交换核心直接与 OLT 中的波长转发器互相连接。在图 4.11(d)中显示了一种不同的方案，这一方案中，OLT 中没有波长转发器，并且在光纤中的波长在被复用/解复用后直接由 OXC 中的光交换核心进行交换。成本、功率和占用空间都得到改进，如从图 4.11(b)到图 4.11(d)中进行的那样。电核心方案与光核心方案比较，通常需要较高的功率并且占据更多的空间，但是相对成本依赖于不同产品如何定价，以及每个端口处的运行比特率。

图 4.11(a)和图 4.11(b)两者之中的 OXC 都具有电接入信号的能力，因而能够实现广泛的性能监测(信号识别和误码率测量)。误码率的测量也能够被用来触发保护交换。进而，它们能够使用嵌入数据流中的带内开销信道发信令到其他的网络单元。(我们将在第 5 章详细研究信令问题。)

图 4.11(c)和图 4.11(d)中的 OXC 不具有考察信号的能力，因而不能进行广泛的信号性能监测。例如，它们不能基于误码率监测触发保护交换，但是作为替代方法，它们可以使用光功率测量作为触发器。这些交叉互连需要一个带外信令信道用来与其他的网络单元交换控制信息。利用图 4.11(c)的配置，附属设备需要有光接口，它们能够处理光交换所引入的损耗。这些接口也需要是单模光纤接口，因为这是大多数光交换被设计成可以处理的接口。此外，宁可使用串联接口(单个光纤对)，而不是并联接口(多个光纤对)，因为每个光纤对需要连接光交换设备的一个端口。

图 4.11(d)的全光配置提供了一种真正的全光网络。然而，它要求更复杂的物理层设计，因为现在信号从它们的源到它们的宿的整个通路上都要保持在光域，在中间节点也应在光域进行交换。设定链路工程是复杂的，并且通常是销售商专有的，在这种配置中不容易使一个销售商的 OXC 和另一个销售商的 OLT 互操作运行。

还需注意，在图 4.11(b)、(c)和(d)中的配置都能够组合在单个 OXC 中。能够使其一些端口带有 O/E/O 转换器，另一些端口被连接到带有 O/E/O 转换器的 OLT，其他一些端口连接到 OLT，没有任何 O/E/O 转换器。

有可能将 OXC 和 OLT 系统一起集成在一个设备中。这样做具有一些显著的优点。它可以省去多个网络单元中多余的 O/E/O 转换器的需要，允许支持有效保护的两个单元之间紧密耦合，使用 OLT 中提供的光监控信道，使得网络中的多个 OXC 之间比较容易地传送信令。例如，在图 4.11(a)中，我们可能具有直接在交叉互连设备上的 WDM 接口，并且消除了局内短程接口。我们将从图 4.11(b)的配置转移到图 4.11(c)的配置。

这种集成方案也有缺点，使得它成为单一销售商的解决方案。因此，为了实现这一简化方案，业务提供商必须从同一个销售商购买他们所需的所有 WDM 设备，包括 OLT 和 OXC。某些业务提供商宁愿从多个销售商得到最好等级的设备，再用它们共同构建他们的网络。此外，这一解决方案不解决涉及的遗留问题，其中 OLT 已经被配置，而 OXC 以后一定会增加进来。

4.4.1　全光 OXC 配置

现在，讨论的重点是了解图 4.11(d)中的有关全光配置的一些问题。如图 4.11 所示，该配置的成本与其他配置相比是有高成本效益的，但缺乏三个关键功能:低速梳理、波长转换和信号再生。低速梳理用来汇聚较低速率流量的信息流使之适合在光纤中传输。一旦光信号经过了多个光纤跨段传输和/或其他有损耗的网络单元，信号就需要再生。

光网络需要波长转换，以改进其利用率。图4.12所示的简单例子说明了这一点。在三个节点的网络中，每一条链路都能够携带三个波长。现在，如图4.12所示的网络中，每条链路上已建立两条光路，现在需要建立一条从节点A到节点C的新光路。图4.12(a)显示了这一情况，其中节点B不能进行波长转换。虽然在该网络中有空闲波长可用，但是在网络中的两条链路上不能使用相同的波长。因此，不能设置所需的光路。另一方面，如果节点B能够进行波长转换，那么就能够建立如图4.12(b)所示的光路。

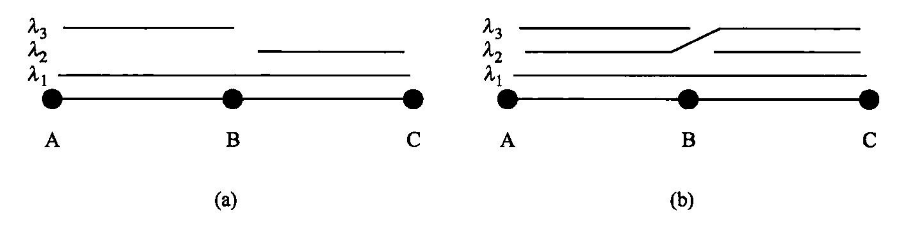


图4.12 需要波长转换的图解说明。(a) 节点B不转换波长;(b) 节点B转换波长

注意，图4.11(a)、(b)和(c)的配置都提供了波长转换和信号再生功能，无论是在OXC本身之中，还是在附属的OLT中使用波长转发器。图4.11(a)也提供了低速梳理，假定电的核心已经被设计成具有这一功能。为了提供梳理、信号再生和波长转换功能，图4.11(d)的配置被改变成包含电核心交叉互连，如图4.13所示。这种配置允许大多数信号在光域交换，使得成本最小，而网络容量最大，同时允许在任何需要的时候路由信号下到电层。正如我们较早讨论的，我们能够同时交换多波带或者多芯光纤以节省光开关端口。

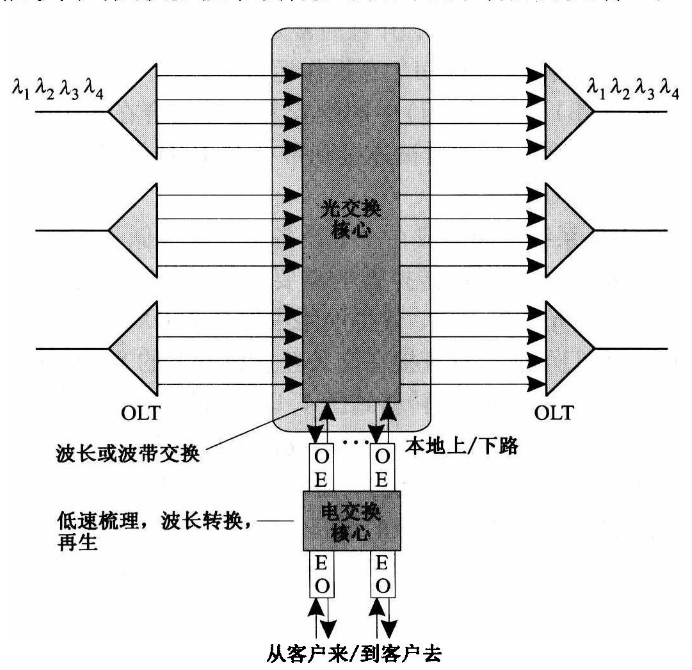


图4.13 实际的“全光”网络节点。该配置中将光核心交叉互连与电核心交叉互连结合在一起。任何时候信号尽可能在光域交换，除了它们需要被梳理、再生，或者需要从一个波长转换到另一个波长时，它们才路由下路到电域

如图4.13所示，注意光交换不一定将信号从任一输入端口交换到任一输出端口。例如，它不需要将波长λ_1的输入信号交换到一个输出端口，该输出端口连接到接纳波长λ_2的复用器。这就允许使用波长平面(wavelength plane)实现某些潜在的简化。

图4.14显示了一个波长平面OXC。来自不同的光纤对的输入信号首先由OLT解复用。在一个给定波长上的所有信号被送到一个专用于该波长的开关矩阵，然后从所有开关矩阵输出的信号被OLT再复用到一起。在有F个WDM光纤对时，每一光纤在有W个波长的节点中使用了F个OLT和W个$2F\times2F$开关矩阵。这就允许在任一输入波长上的一路信号或者所有信号在本地下路。与此相反，图4.13的配置使用了F个OLT和W个$2F\times2F$开关矩阵才提供同样的能力。例如，考虑$F=4$，$W=32$，这是切合当前实际的数目。在这种情况下，图4.14配置使用4个OLT和32个8×8开关矩阵。与此对照，图4.11(b)需要4个OLT和256×256个开关矩阵。正如在2.7节中所看到的，构造较大的光开关矩阵比构造较小的开关矩阵明显困难得多，并且将需要使用类似于模拟束控微镜技术，而小光开关可以使用多种不同的技术来实现。

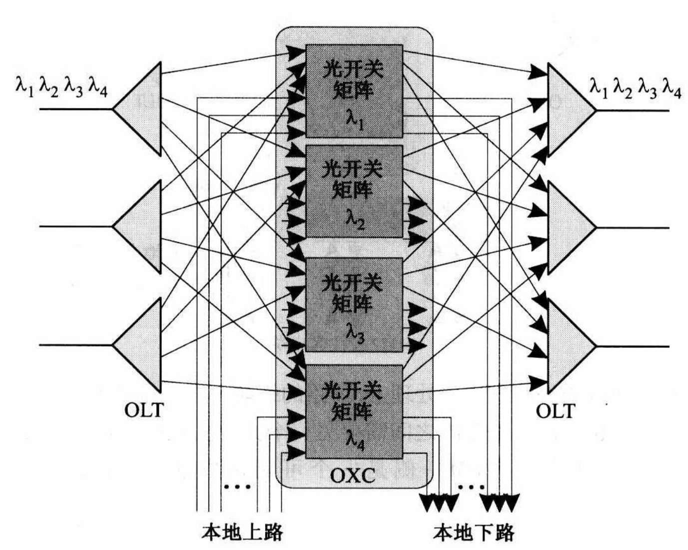


图4.14　光核心波长平面OXC，它包括一个光开关平面，每个波长一个。如果我们希望在这个节点灵活地下路和上路任一波长，则其中每一个开关矩阵应是一个$2F\times2F$的开关矩阵，它包括F芯光纤，每芯光纤有W个波长

基于上面的讨论，看来波长平面方法可提供一种较便宜的办法实现大规模无阻塞光开关矩阵。然而，我们并没有考虑如何优化上/下路终端的数目(这些终端是电交换核心上的波长转发器或O/E接口)。图4.13和图4.14都假设有足够的端口，以终接所有WF个信号。这几乎是不可能的情况，因为只有部分流量需要下路，而且终端是很昂贵的。此外，注意到如果在电开关矩阵中确实需要WF个终端，最好的解决办法就是使用图4.11(a)所示的电核心配置，而无须波长平面开关矩阵。

如果我们有总数T个终端，且它们都有可调谐激光器，并且我们希望下路WF路信号中的任一路，这就需要在波长平面开关矩阵和终端之间附加一个$T\times WF$光开关矩阵，如图4.15所示。相反，如果使用大规模无阻塞开关矩阵，将只需要将T个终端连接到这个开

关矩阵的 T 个端口，这样就得到了一个 $(WF+T)\times(WF+T)$ 的开关矩阵。这种情况一定程度上降低了波长平面方法的吸引力。

概括地说，波长平面方法需要在设计中逐个考虑光纤数量、上/下路流量占全部流量的多少、终端数目及它们的可调谐能力。使用大规模开关矩阵，能够以灵活的方法划分端口，用以考虑所有这些参量的变化；唯一的限制是总的可用端口数。作为这些类型折中的另一个例子请见习题4.7。

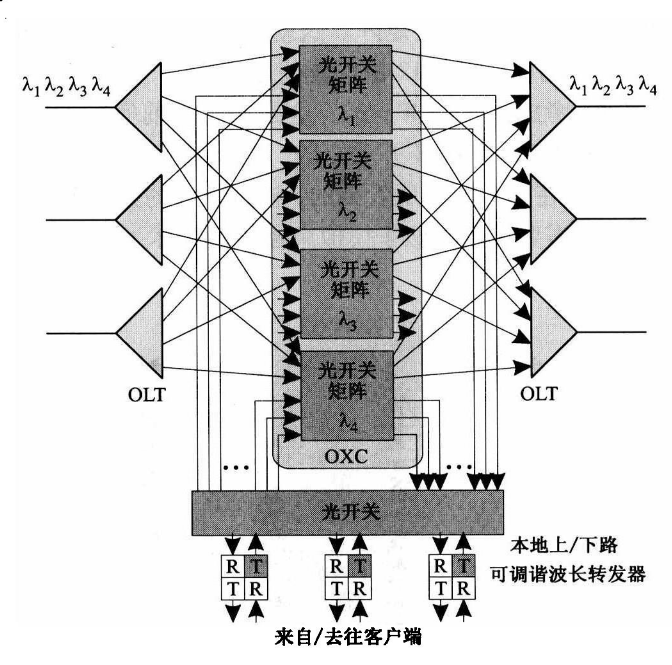


图4.15 在波长平面方法中处理上/下路的终端。在可调谐波长转发器和波长平面开关矩阵之间需要另一个光开关矩阵。其中T表示发射机，假设在WDM一侧是一个可调谐发射机，R表示接收机

总结

本章研究了构成WDM网络的基本网络组件。建议读者返回去查阅第2章，以便理解构建这些网络组件的各种技术。

WDM网络提供了电路交换的光路，这些光路能够有与它们相关联的不同程度的透明度。在这种网络中波长可以重用，以用于多条光路，只要在给定的链路上不要将一个波长同时分配给两条光路。在出故障时网络可以被保护光路。在光网络的用户之间，如IP路由器之间光路可以被用来提供灵活的互连，允许路由器拓扑结构进行调整，以满足路由器网络的需要。

光线路终端(OLT)复用和解复用波长，并被用于点到点的系统中。通常情况下，OLT包含波长转发器、复用器和光放大器。波长转发器用来转换用户信号使之适应光层。它们也是OLT中成本和占用空间的主要部分。在某些情况下，如果在其他设备中配置一些接口，在适当波长上提供已经适配的信号，就能够不用波长转发器。

光上/下路(分插)复用器(OADM)从WDM信号中下路和上路可选择的一些波长，同时允许其余波长直通。与使用背到背互连OLT的方案比较，或者与依靠别的设备去处理直通流

量的方案比较，OADM 提供了一种有成本效益的方法来实现这一功能。OADM 通常配置在线形或环形拓扑中。

可能有几种类型的 OADM，它们的性能取决于能够上/下路的波长数、额外添加波长上/下路的容易程度、是静态的还是可重构的等因素。我们研究了 OADM 的基本配置方式:并联的、串联的和波带下路的。它们中的每一种方式都有其各自的优缺点。我们也考察了可重构 OADM 配置，它们使用了可调谐滤波器和/或复用器，以及可调谐激光器，以便在网络中提供最大可能的灵活性。

光交叉互连(OXC)是光层中的另一个关键的网络单元。OXC 是大规模的开关矩阵,用于动态提供业务及提供网络恢复功能。通常，OXC 配置在网状网结构中。与 OADM 一样，也有几种不同类型的 OXC，从带有电交换核心、能够梳理 STS-1 速率流量的 OXC 到全光 OXC，后者能够交换波长、波带和整芯光纤。光核心交叉互连也能够二端连接光-电-光转换器，实现某些由电核心交叉互连提供的梳理和波长转换能力，但是不适合梳理细粒度的流量，如 STS-1 的流量。每一种配置在网络中都有它自己的作用。

进一步阅读材料

关于不同类型的 OLT、OADM 和 OXC 的信息，不是那么容易找得到的，因为许多商业实现方案具有专利权。浏览网络设备销售商的主页，将会提供该方面不同产品的某些性能的说明。

几个较早的测试平台探究了这些网络单元的不同形式。例如，文献[Ale93，Kam96]使用了一种静态的全光 OXC，它提供了一种固定的、没有任何交换和波长转换的互连方案。文献[Cha94，CEG⁺96]探讨了一种并联的 WADM 配置，以及带有电交换核心的 OXC。文献[Hil93]开发了一种没有波长转换的全光 OXC。文献[WASG96，Gar98]开发了一种并联的 WADM，以及没有波长转换的、小型的全光 OXC。为了了解别的相关测试平台和配置，也可看文献[HH96，OWS96，Der95，MS96，Ber96a，Ber96b，Bac 96，RS95，Chb98，KWK⁺98]。波带的使用已经在不同的文章中进行了讨论[Ste90，GRW00，SS99]。对光交叉互连进行讨论及将它们与电交叉互连进行比较，可以看文献[GR00，GRL00]。

较早的多度 ROADM 使用了广播选择结构，利用液晶动态信道均衡器(dynamic channel equalizer，DCE)[也称为动态增益均衡器(dynamic gain equalizers，DGE)或者动态频谱均衡器(dynamic spectral equalizers，DSE)]，可以让信号通过或者将信号阻塞[VTM⁺03][PCH⁺03]。在文献[BSAL02，HB08]中报道了一种用于 2 度 ROADM 的广播选择结构。本章中的多度 ROADM 的例子可以参阅文献[RC08，HB08]。

习题

4.1　考虑有两个相邻中间节点 A 和 B 的环形网，每个节点带有一个 OADM。

(a)考虑下述情况:节点 A 上的 OADM 上路波长为λ_1，节点 B 上的 OADM 下路相邻波长λ_2。假设最小接收功率为 - 30 dBm，发送功率为 0 dBm。接收机的相邻信道之间的串扰必须小于 15 dB。假定信号在 OADM 上/下路时没有损耗。问 OADM 相邻信道的串扰抑制比是多少？该值如何随着两个节点之间的链路损耗改变？

(b)其次，考虑两个 OADM 都上/下路波长λ_1的情况。所担心的情况是，λ_1的某些功率没有在节点下路，而是通过节点泄漏出去。在接收机处，信道内串扰必须低于所需信号至少 -30 dB。利用与上述同样的假定，问 OADM 所需的信道内串扰抑制比是多少？该值如何随着两个节点之间的链路损耗改变？

4.2 这一习题说明当网络规划者必须使用的 OADM 只能限制在某些信道能够上/下路时，所面对的一些困难。考虑一个 4 节点的线形网络，节点按顺序称为 A、B、C 和 D。现在有 3 个可用波长λ_1、λ_2和λ_3，并且假定 OADM 下路两个固定的波长。即能够在 OADM 处下路λ_1、λ_2或者λ_2、λ_3或者λ_1、λ_3。现在需要建立下述光路:AB、BC、CD、AC 和 BD，你应该在每个节点配置什么 OADM？假设以后的某个光路流量发生了变化，并且现在需要用光路 AD 和 BC 取代光路 AC 和 BD，你必须做哪些改变来支持这一新的流量？

4.3 考虑一个带有串联 OADM 的线形网络。假定发送功率为 0 dBm，最小接收功率为 -30 dBm；每个 OADM 具有 2 dB 的直通损耗、1 dB 的下路路径损耗和 1 dB 的上路路径损耗。假定每个 OADM 提供的相邻信道抑制比是 20 dB，并假定接收机的相邻信道的功率必须比所需信号的功率至少低 15 dB。

(a)编写一个计算机程序，用网络中的一组光路及其波长和每对相邻节点之间的损耗作为程序的输入，并确定每一条光路是否可行。程序也应该确定任何波长冲突，即确定是否存在 2 条重叠的光路，以及 2 条光路是否分配了相同的波长。

(b)一条光路需要再生之前能够直通过最多几个 OADM？画出该数量作为网络中链路总损耗的函数的图。

(c)画出为一个有 5 个节点的网络所编程序的输出，该网络具有 5 个节点，顺序编号从 1 到 5，节点之间的链路损耗为 5 dB，下列组光路和波长分配如下:$(1,5,\lambda_1)$、$(2,4,\lambda_2)$、$(3,5,\lambda_3)$、$(1,4,\lambda_4)$。

4.4 本习题探讨构建完全可重构 OADM 的结构。考虑如图 4.7(d)所示的并联结构。如果不使用大规模光开关矩阵，你如何构建一个像该图所示那样的完全可重构的并联 OADM？你可以使用可调谐滤波器、无源分束器和合束器，以及小型(2×2)光开关。这些解决方案需要满足 4.3 节所描述的理想 OADM 的特性(1)和(2)。至于特性(3)，你仍然需要保持损耗不变，不管有多少路信道上路或下路，但是允许你对该损耗给出一个合理的高值。比较你的解决方案与图 4.7(d)所示的方案的优缺点。

4.5 你来设计一个 5 个节点的环形网，该网有 1 个枢纽节点和 4 个远程节点。每个远程节点需要在环的两个方向上接收从枢纽节点来的/发往枢纽节点去的 2 个波长流量，即每个远程节点需要两个专用波长，而在枢纽节点终接所有的波长。你必须在下述两个系统之间选择其中之一。

第一个系统使用 2 个波带中的 8 个信道，每个波带有 4 个信道。它提供波带 OADM，能够下路这 2 个波带中的 1 个。一旦某一波带被下路，该波带中的 4 个波长必须被再生。1 个波带 OADM 的成本是 20 000 美元，而 1 个信道再生器的成本是 10 000 美元。该系统不需要光放大器。

第二个系统也使用 8 个信道，但是不分波带。它提供 SC-OADM，能够下路任一波长。每个 SC-OADM成本是 10 000 美元。对于该系统需要 2 个光线路放大器，每个成本是 30 000 美元。如果只考虑设备的价格，你愿意选择哪一个系统？

4.6 本习题说明需要大规模 OXC，以及说明使用波带的价值。

考虑一个有 256 个端口的全光 OXC，配置如图 4.11(d)所示。每个 WDM 线路系统携带 32 个波长，75% 的光路直通过节点，而其余 25% 的光路下路和上路到连接于该 OXC 的路由器上。每条上路和下路到路由器的光路占用 2 个 OXC 端口。

(a)该 OXC 能够支持多少个 WDM 线路系统？

(b)下面假定 25% 的直通光路需要从一个波长转换到另一个波长。这可以通过将光路送到连接于 OXC 的一组再生器/波长转发器中的一个来实现。每个这样的再生器使用 2 个 OXC 端口。因此，需要波长转换的 1 条光路使用 4 个端口。现在问:该 OXC 能够支持多少个 WDM 线路系统？

(c) 现在假定 WDM 线路系统被设计成带有 8 个波带，每个波带有 4 个波长。假设所有直通光路都不需要解复用到单个信道就能以波带直通通过。对于那些需要下路和上路的光路，整个波带下路并在通过 OXC 以后被解复用。不需要波长转换。问该 OXC 能够支持多少个 WDM 线路系统？

4.7 考虑图 4.14 所示的波长平面交换结构。并请考虑共有 4 芯光纤，每芯光纤有 40 个波长的情况。我们必须设计一个节点，使其可以下路其中任意 4 路信号。（请注意，这就意味着能够下路特定的一芯光纤中的所有波长，而在其他的光纤上直通所有波长。）这些波长下路到有可调谐激光器的波长转发器上。40 个波长被分成 5 个波带，每个波带 8 个波长，而且可调谐激光器能够在整个波带内调谐。

(a) 画出该节点的方框图，指出需要波长转发器的最少数目。将该方案与使用大规模无阻塞开关矩阵的方案进行比较。

(b) 现在假定有可调谐激光器，它们能够在两个波带内进行调谐，而不是一个波带。这种情况将如何改变？

参考文献

[Ale93] S. B. Alexander et al. A precompetitive consortium on wide-band all-optical networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11:714–735, May–June 1993.

[Bac96] E.-J. Bachus et al. Coherent optical systems implemented for business traffic routing and access: The RACE COBRA project. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1309–1319, June 1996.

[Ber96a] L. Berthelon et al. Experimental assessment of node cascadability in a reconfigurable survivable WDM ring network. In *Proceedings of Topical Meeting on Broadband Optical Networks*, 1996.

[Ber96b] L. Berthelon et al. Over 40,000 km across a layered network by recirculation through an experimental WDM ring network. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, 1996.

[BSAL02] A. Boskovic, M. Sharma, N. Antoniades, and M. Lee. Broadcast-and-select oadm nodes application and performance tradeoffs. In *OFC 2002 Technical Digest*, pages 158–159, Anaheim, Mar. 2002.

[CEG+96] G. K. Chang, G. Ellinas, J. K. Gamelin, M. Z. Iqbal, and C. A. Brackett. Multiwavelength reconfigurable WDM/ATM/SONET network testbed. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1320–1340, June 1996.

[Cha94] G. K. Chang et al. Experimental demonstration of a reconfigurable WDM/ATM/SONET multiwavelength network testbed. In *OFC'94 Technical Digest*, 1994. Postdeadline paper PD9.

[Chb98] M. W. Chbat et al. Towards wide-scale all-optical networking: The ACTS optical pan-European network (OPEN) project. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):1226–1244, Sept. 1998.

[Der95] F. Derr. Design of an 8 × 8 optical cross-connect switch: Results on subsystems and first measurements. In *ECOC'95 Optical Networking Workshop*, 1995. Paper S2.2.

[Gar98] L. D. Garrett et al. The MONET New Jersey demonstration network. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):1199–1219, Sept. 1998.

[GR00] J. Gruber and R. Ramaswami. Moving towards all-optical networks. *Lightwave*, 34(8):40–49, Dec. 2000.

[GRL00] J. Gruber, P. Roorda, and F. Lalonde. The photonic switch crossconnect (PSX)—Its role in evolving optical networks. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 678–689, 2000.

[GRW00] O. Gerstel, R. Ramaswami, and W-K. Wang. Making use of a two stage multiplexing scheme in a WDM network. In *OFC 2000 Technical Digest*, pages ThD1-1–ThD1-3, 2000.

[HB08] J. Homa and K. Bala. Roadm architectures and their enabling wss technology. *IEEE Communications Magazine*, 46(7):150–154, July 2008.

[HH96] A. M. Hill and A. J. N. Houghton. Optical networking in the European ACTS programme. In *OFC'96 Technical Digest*, pages 238–239, San Jose, CA, Feb. 1996.

[Hil93] G. R. Hill et al. A transport network layer based on optical network elements. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11:667–679, May–June 1993.

[Kam96] I. P. Kaminow et al. A wideband all-optical WDM network. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):780–799, June 1996.

[KWK+98] M. Koga, A. Watanabe, T. Kawai, K. Sato, and Y. Ohmori. Large-capacity optical path cross-connect system for WDM photonic transport network. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):1260–1269, Sept. 1998.

[MS96] W. C. Marra and J. Schesser. Africa ONE: The Africa optical network. *IEEE Communications Magazine*, 34(2):50–57, Feb. 1996.

[OWS96] S. Okamoto, A. Watanabe, and K.-I. Sato. Optical path cross-connect node architectures for photonic transport network. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1410–1422, June 1996.

[PCH+03] A. R. Pratt, B. Charbonnier, P. Harper, D. Nesset, B. K. Nayar, and N. J. Doran. 40 × 10.7 gbit/s dwdm transmission over meshed ulh network with dynamically reconfigurable optical crossconnects. In *OFC 2003 Technical Digest*, Atlanta, Mar. 2003.

[RC08] P. Roorda and B. Collins. Evolution to colorless and directionless roadm architectures. In *OFC 2008 Technical Digest*, San Diego, Feb. 2008.

[RS95] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pages 489–500, Oct. 1995. An earlier version appeared in *Proceedings of IEEE Infocom'94*.

[SS99] A. A. M. Saleh and J. M. Simmons. Architectural principles for optical regional and metropolitan access networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 17(12), Dec. 1999.

[Ste90] T. E. Stern. Linear lightwave networks: How far can they go? In *Proceedings of IEEE Globecom*, pages 1866–1872, 1990.

[VTM+03] M. Vasilev, I. Tomkos, M. Mehendale, J.-K. Rhee, A. Kobyakov, M. Ajgaonkar, S. Tsuda, and M. Sharma. Transparent ultra-long-haul dwdm networks with "broadcast-and-select" oadm/oxc architecture. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 21(11):2661–2672, Nov. 2003.

[WASG96] R. E. Wagner, R. C. Alferness, A. A. M. Saleh, and M. S. Goodman. MONET: Multiwavelength optical networking. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, 14(6):1349–1355, June 1996.

第5章　控制与管理

网络管理是所有网络的重要组成部分之一，无论如何，它都是一种诱人的特定技术，只要采用当前的管理系统对网络进行管理与互操作，在网络中就可以配置网络管理。大型网络的运营与管理成本是续生成本，许多情况下它决定了在网络中配置设备的成本，因此，与关注设备预付成本相比较，运营商更重视寿命期成本的最小化。首先，简单地介绍网络管理一般概念及其在光网络管理中的应用，然后讨论光层业务及光网络管理的各种问题。

5.1　网络管理功能

网络管理通常由对网络运营很重要的若干功能构成。

1. 性能管理涉及监控与管理评估网络性能的各种参数，性能管理是网络管理的一种基本功能，使业务提供商能够为其客户提供服务质量保证，确保其客户遵循业务提供商所规定的要求。性能管理还需要为网络其他管理功能提供输入信号，尤其是检测到网络异常状态情况下的故障管理。这些功能将在5.5节中进一步讨论。
2. 故障管理功能负责失效发生情况下失效检测与失效部件隔离，网络还需要恢复失效所致的中断业务，但是通常认为这是网络的另一种独立的功能，即第6章的主题。故障管理将在5.5节中讨论。
3. 配置管理涉及网络规律性变化相关的系列管理功能，网络设备管理这一基本功能属于该范畴，它包含网络设备的跟踪和设备添加/删除的管理，其中包括所涉及的业务重路由和设备软件版本管理。

   配置管理的另一个基本功能是连接管理，它涉及网络连接的建立、拆除与跟踪。该功能可以采用集中式管理系统来实现，也可以采用分布式网络控制系统来实现。在连接的建立/拆除频发情况下，或当网络很大很复杂时，分布式网络控制必不可少。

   最后，进入网络光层的外部客户信号需要转换为光层所适用的信号，该功能为适配管理。适配管理及其他配置管理功能将在5.6节中讨论。
4. 安全管理包括如用户鉴权和属性设置(如基于每个用户的读写权限)等日常管理功能。从安全角度看，网络通常可以在水平方向和垂直方向上划分为域。垂直划分是指一些用户只允许访问某些网元，而不允许访问其他网元，例如，本地专业技术人员只允许访问其所负责的网元，而不允许访问其他网元。水平划分是指一些用户允许访问网络所有网元的某些参数，例如，租用光路的用户能够访问该光路穿过的所有节点的光路性能参数。

   安全管理还涉及网络用户数据的保护，使之不受越权者窃听或损坏。这部分问题需要采用传输前数据加密及为合法用户提供解密能力来解决。
5. 计费管理是负责记账和记录网络部件使用历史数据的功能。光网络计费管理功能与其他网络相同，不再做进一步的讨论。

光网络需要考虑的另一个问题是安全性管理，需要确保光辐射符合眼睛安全所规定的限制。该问题将在5.7节中处理。

5.1.1 管理架构

网络管理的大部分功能采用集中式管理系统的分层结构来实现，但是这种方法相当缓慢，管理系统与网络各部分之间的通信可能需要花费数百毫秒乃至数秒，因为该过程通常涉及大量的软件通道开销。非集中式方法比集中式方法通常更快速，甚至对仅有几个节点的小型网络也是如此。因此，需要快速响应的某些管理功能(如必须快速处理的故障响应和连接的建立与拆除)必须采用非集中方式，例如，同步SONET环网可以在50 ms内修复故障，因为该过程完全采用非集中方式，所以这是可能做到的。为此，恢复更多地被视为自动控制的功能，而不看做是网络管理的组成部分。

非集中式处理某些功能的另一个原因出现在网络规模变得很大的时候。在这种情况下，采用单一中央管理系统来管理整个网络将更困难。此外，网络还可能包括由不同管理系统所管理的多域，每个域的管理系统需要与其他域的管理系统联系，以协调实现某些功能。

图5.1给出了在一个典型网络中如何实现网络管理功能的示意图。管理以分层方式来实现，在许多情况下包括多个管理系统。被管理的单独部件称为网元，网元包括光线路终端(OLT)、光分叉复用器(OADM)、光放大器和光交叉连接(OXC)。每个网元由其自己的网元管理系统(EMS)来管理，网元本身有一个内置的代理，该代理与其网元管理系统通信。代理利用软件来实现，通常内嵌在网元的微处理器中。

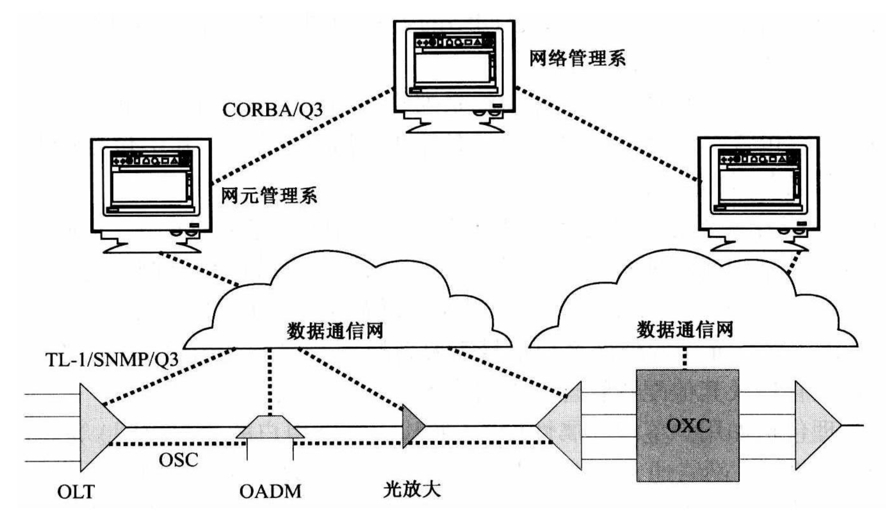


图5.1 一个典型光网络的网络管理示意图，其中显示了网元(OLT、OADM、OXC和光放大器)、管理系统及其相关接口

网元管理系统(EMS)通常与一个或多个网元相连接，并通过数据通信网(DCN)与网络中其他网元通信。除了数据通信网，网元间还需要一个快速信令通道来交换实时控制信息，以管理保护倒换及其他功能。DCN和信令通道可以采用许多不同的方法来实现(将在5.5.5节中讨论)。图5.1所示的光监控通道(OSC)就是一个例子，它用一个专用波长来实现控制与管理功能，尤其对有光放大器的线路系统更是如此。

多个网元管理系统可以用于管理整个网络。每个网元管理系统通常只管理单一销售商的网元，例如，采用销售商 A 的 WDM 线路系统和销售商 B 的交叉连接，运营商将可能采用两个网元管理系统，其中一个用于管理线路系统，而另一个用于管理交叉连接，如图 5.1 所示。

网元管理系统通常在一段时间有一个网元的视图，但没有整个网络的综合视图，也没有它不能管理的其他网元的视图。因此，网元管理系统通过管理网络与网络管理系统(NMS)或运营支撑系统(OSS)轮流通信。网络管理系统具有全网概念，它能够管理不同销售商的不同类型网元。在某些情况下，它是具有多层结构的管理系统。多种运营支撑系统可以用于实现不同功能，例如，Verizon 公司、Southwestern Bell 公司和 Bellsouth 公司等这些美国区域贝尔运营公司(RBOC)，采用了 Telcordia Technologies 公司的一套运营支撑系统，其中网络监控与分析系统(NMA)用于故障管理、干线库存和记录保存系统(TIRKS)用于网络中设备管理、传送单元管理系统(TEMS)用于配置电路；这些系统可以追溯到数十年前，当网络中引入新网元时，为支持新网元通常要选定时间来修改这些系统。

除了网元管理系统外，通常还要提供简化的本地管理系统，使技术人员和其他业务人员能对单独网元进行配置与管理。该系统通常安装在笔记本计算机或基于简单文本的终端上，它与单独网元相连接，即可实现网元的配置与指配。

5.1.2 信息模型

每个网元的管理信息采用信息模型(IM)方式来表示，信息模型通常是一种面向对象的表示法，用于规定系统的属性和网元是如何管理等外部行为。信息模型是采用网元内嵌软件及用于管理网元的网元与网络管理系统来实现的。信息模型通常采用面向对象的编程语言。

对象提供了一种抽象方法来给部分系统建模。它具有一定的属性和与之相关的函数。函数描述对象的行为或对对象执行的操作，如最简单的函数是创建一个特定类型的新对象。可能有许多目标类型或类，表示系统的不同部分。面向对象建模的一个重要概念是继承性。一个对象类可以继承其另一个父对象类，它可以具有其父对象类的所有属性和行为，并且可以增加额外的属性和行为。在本文中就提供了一个具体的例子，光线路终端(OLT)通常由一个或多个设备机架构成，每个机架由多个子架和多种类型的子架构成，每个子架有数个线卡槽位，线卡有许多不同的类型，如转发器、放大器和复用器。就此而言，有一种对象类称为机架，而另一种对象类称为子架，机架对象具有子架对象中的一个属性，多种类型的子架可以用从父对象子架继承的对象类方式来表示，例如，可能有一个公用设备子架和一个转发器子架，它们继承了通用子架对象。

还有一种对象称为槽位，一个子架对象具有另一种槽位对象中的一个属性。每个线卡对象与槽位相对应，多种类型的线卡可以用从父对象线卡继承的对象类方式来表示，例如，转发器子架可以包含多种转发器类型(如一类处理 SONET 信号，而另一类处理千兆以太网信号)，公用设备子架可以容纳多种类型的线卡，如放大器卡、处理器卡和供电卡。

每个对象具有相应的多种属性，包括管理系统所设置的一套参数和管理系统所监控的一套参数。例如，每个线卡对象通常具有一个相应的状态属性(即运行、停运或故障)，还有这些状态转换控制的详细行为。

典型的信息模型的另一个例子是光路建模所用的连接路径概念。而且还可以定义多种类

型的路径，每个路径具有多种相应的属性，包括可配置的属性及用于路径性能监控的其他属性。

5.1.3 管理协议

大多数网络管理系统在管理者及其所管理的代理之间采用一种主从关系，管理者查询代理，以获得网元参数的状态(称为 get 操作)，例如，管理者可以定期查询代理，以获得性能监控信息。管理者也可以改变网元的变量值(称为 set 操作)，采用该方法可以使网元内的变化生效，例如，管理者可以采用该方法来改变网元(如多度 ROADM)内部开关的配置。除了这些方法，代理有时需要发送信息到其管理者。如果代理检测到网元中的问题，则必须提醒其管理者。然后，代理给管理者发送一条通知信息。如果情况严重，则采用告警方式，有时这称为"陷阱(报文)"。

网络管理涉及多种标准及约数千个相关缩略语。这里只是一个简要的总结，大多数情况下，网元的物理管理接口通常采用以太网或 RS-232 串行接口。

互联网领域采用一种基于简单网络管理协议(SNMP)的管理架构，SNMP 是一种运行在标准互联网协议栈上的应用协议，管理者通过 SNMP 与代理通信，SNMP 的信息模型称为管理信息库(MIB)。

北美的运营领域已经采用简单文本(即 ASCII)命令和事务处理语言-1(TL-1)。TL-1 发明于采用简单终端接口和文本命令集作为网元管理主要方法时，但是至今仍在广泛应用，并将还可能持续一段时期，因为当前许多管理系统仍然主要只支持 TL-1。

运营领域的另一种管理架构称为电信管理网(TMN)。TMN 规定了一种管理系统分层结构和面向对象的管理信息建模方法，还规定了管理者及其代理之间的通信协议。这些协议称为通用管理信息协议(CMIP)，CMIP 通常运行在开放式系统互连(OSI)协议栈中，其相应的管理接口称为 Q3 接口。它还为在更常用的 TCP/IP 协议簇上运行 CMIP 规定了适配。特定对象模型是基于一种称为管理对象定义指南(GDMO)的标准。TMN 的两个首要概念(即分层管理方式和面向对象的信息建模方法)目前已经广泛地应用，但是 TMN 所规定的特定协议、接口和对象模型尚未得到广泛的接受，主要是因为整个系统的复杂性。

还有另一种管理架构是基于通用对象请求代理体系结构(CORBA)模型，它允许不同销售商的网元及其管理系统一起使用。CORBA 是一种软件产业标准，为不同系统能够实现信息交换与联合处理及相互通信而开发。该架构采用 CORBA 作为网元管理系统与集中式网络管理系统之间的接口。

5.2 光层业务与接口

光层为 SONET/SDH、IP/MPLS、以太网层及光传送网(OTN)的电层等其他层提供光路，OTN 包括光信道传送单元(OTU)子层和光信道数据单元(ODU)子层(见 3.2 节)。本书中的光层可以看做服务器层，而由光层提供业务的更高层可以看做客户层。根据这一观点，光层及其客户层之间需要明确地规定业务接口。这种被管理的光路业务的关键属性如下：

- 光路需要根据客户层请求和网络维护需求而建立和拆除。
- 光路带宽需要在客户层与光层之间协调，通常由客户层指定光路所需的带宽。
- 光网络的输入端和输出端可能需要适配功能，以便将客户层信号转换成与光层兼容的

信号。该功能通常由波长转发器提供，如4.1节中所讨论的那样。需要确定客户层与光层之间信号类型的特定范围(包括比特率和所支持的协议)。

- 光路需要确定性能质量保证等级，通常是误码率(典型要求为小于等于10^{-12})。需要在网络内设置适当的性能管理，才能保证满足该项要求。
- 需要支持多等级保护，这将在第6章中讨论，例如，受保护、无保护和尽力而为的保护，加之能够在网络保护带宽上承载低优先级数据。此外，恢复时间要求还可以随应用而变化。
- 光路可以是单向或双向的。当前，几乎所有光路都是双向的。但是如果一个方向比另一方向需要更大的带宽，则需要支持单向光路。
- 需要支持多播(即下路并续传)功能。多播对支持视频或会议信息的发布很有用。在下路并续传方面，通过一个节点的信号在本地下路，同时信号的备份下行继续传输到下一个节点。当多环互连时，下路并续传功能对网络生存性特别有用，有关这点将在第6章中讨论。
- 存在抖动要求，特别是对SONET/SDH连接。为满足这些要求，网络可能需要3R再生。网络采用2R再生将增加抖动，一些信号可能是不能接受的。1.5节中就透明性问题讨论过3R和2R。
- 对某些类型的业务有最大时延要求。这可能会限制链路允许的最大传播延迟(或等价链路长度)。在光路设计时，需要予以考虑。
- 需要支持大量的故障管理，使网络能够上报告警的根本原因，并实行故障的充分隔离。这点很重要，因为单一故障可能触发多个告警。源告警上报实际故障，而其余告警需要抑制。从管理角度上看，不希望有这些其余的告警，它们会引起网络中多个设备对该故障产生误响应(这是不允许的)。下面将看到这种例子。

为支撑这些业务的传送，在光层与客户层之间需要一个控制与管理接口。该接口使客户能够设置一组光路建立或拆除，并设定该光路有关业务参数。该接口还能使光层为客户层提供性能与故障管理信息，能够承担这两种功能中的其中一个功能。当前是通过管理系统来使用这种简单的接口。一个独立的管理系统通过与光层的网元管理系统(EMS)通信，然后网元管理系统反过来管理光层。

只要光路的建立不太频繁并保持较长的时间，目前的网络运行方法可以胜任。将来，很可能在大型网络中采用更动态地指配与拆除光路。在这种场合下，光层与客户层之间需要规定信令接口。例如，IP路由器可以通过该信令接口发送信令给与之连接的光交叉连接设备，以建立和拆除光路，并且确定其保护等级。至于是否需要这一接口，有不同观点，一些运营商认为，应该把光层管理与其客户层分离，独立地规划与运行光网络。如果光层服务于多种类型的客户层，并且允许其管理与特定客户层分离，那么这种方法是合理的。其他人倾向于将客户层与光层的紧密结合。这适宜于如果光层主要服务于单一客户层，并且需要快速地建立和拆除连接(如前所述)的情况。该问题将在5.6节中进一步讨论。

5.3 光层中的层

光层是一个复杂的实体，主要实现几项功能，如复用波长、交换与路由波长和监控网络中各种等级的网络性能。为了有助于描述管理功能和提供不同设备类型之间的合理边界，需要进一步将光层细分为若干子层。

将利用如3.2节所叙述过的光传送网(OTN)体系架构作为分层光网络的模型，如图5.2所示。在3.2节中主要讨论了OTN的电层，现在集中讨论光层。

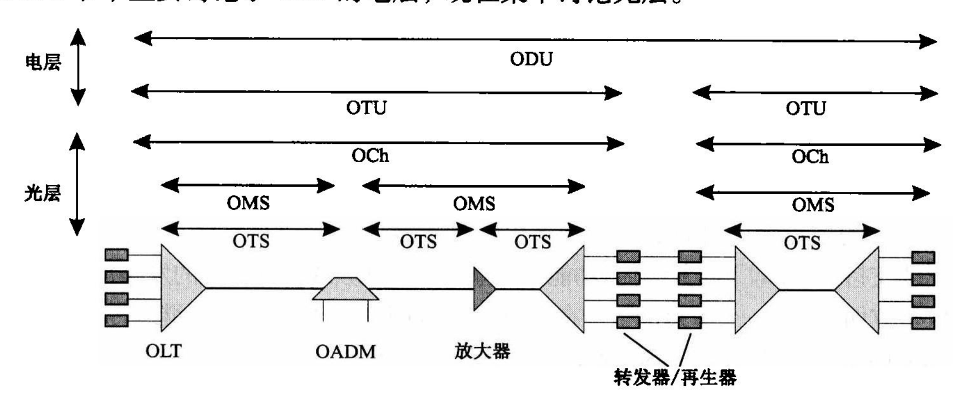


图5.2 OTN中分层示意图。其中，光层为光信道层(OCh)、光复用段层(OMS)和光传输段层(OTS)。电层是光信道数据单元层(ODU)和光信道传送单元(OTU)层

光层的最上层是光路层(OCh)。该层负责光路端到端的路由。已经采用了光路这一术语来表示光连接。更准确地说，光路是两个节点之间光信道的路径，承载着整个波长的流量值。一条光路穿越网络中的许多条链路，其中与承载其他光路的许多波长一起被复用。沿途还可能得到再生。要注意的是，光层中并不包含任何电时分复用功能。因此，两个节点之间没有任何电复用/解复用的一条10 Gb/s的连接，将认为是一条光路。

OLT间或OADM间的每条链路表示一个光复用段(OMS)，它承载了多个波长。而每个OMS反过来包含了几个链路段，每个链路段是两级光放大器之间的链路部分。该部分就是一个光传输段(OTS)，OTS由OMS连同一条附加的光监控通道(OSC)构成。OSC将在5.5.7节中讨论。

OTN光层通过OCh层提供光链路连接到电层。在OTN体系架构中，在OTN的OCh层之上的电层就是其光信道传送单元(OTU)层，它涉及个别的光链路。OTU层之上的电子层就是光信道数据单元(ODU)层，ODU层用于由多条光链路构成的连接。请注意，OTN电层可以用其他客户层协议替代，如SONET。SONET的段层具有与OTN的OTU层相同的作用，并且SONET的线路与通道层同OTN的ODU层具有相同的作用。

原则上，一旦规定了不同层之间的接口，销售商就可能提供从光放大器到WDM链路乃至整个WDM网络的标准化设备。同样重要的是，这些层有助于分解网络所必需的管理功能(见本章和第6章)，例如，波长的下路与上路属于在光复用段层(OMS)实现的功能，对每个波长的光功率监测也属于该层，但是总功率的监测既可以属于OTS层，也可以属于OMS层，这取决于是否包含光监控信道(OSC)。

上述的光层定义不包括提供更先进的光分组交换业务的网络。将在第9章中讨论能够提供这种业务的光分组交换网络。然而，该类型网络实现商用化还需要若干年时间。

5.4 多销售商互操作性

业务提供商喜欢在共同运行的单一网络中配置多销售商设备。这对压低成本及降低对任一销售商的依赖性而言是可取的，也是网络标准背后的推动因素之一。例如，如果没有标准

化，则在每一对销售商之间需要专门的互操作性，而不是采用所有销售商都遵循的单一标准化接口来处理。标准化的另一个重要作用是操作人员可以在单一类型设备上进行培训，然后就能够管理很多销售商各种类型的设备，而不需要针对每个销售商的设备进行单独培训。

但是，具备不同销售商 WDM 设备之间的互操作性，说起来容易做起来难。SONET 标准制定于 20 世纪 80 年代后期，花费了十余年才实现了不同销售商设备之间的互操作性。至于 WDM，在光域上获得互操作性是特别困难的，因为其接口是相当复杂的模拟接口，而不是简单的数字接口。为了实现互操作性，需要标准化的参数包括光波长、光功率、信噪比、比特率，以及监控信道的波长、比特率及其内容。不同销售商在其链路设计中明显采用了不同的参数，并对各种损伤采取了不同的折中方案。例如，销售商 A 可能选用直接调制激光器，并采用网络内的色散补偿来消除色散；而销售商 B 则可能选用外调制激光器来避免网络内的色散补偿。这样，很难在同一 WDM 链路的两端分别采用销售商 A 和销售商 B 的设备。即使可以获得某些互操作性，在这种环境下实现故障的定位与隔离是相当困难的。

不要试图解决这个复杂的问题，互操作性的实际解决方法是采用再生器或转发器来互连完全不同的全光子网，如图 5.3 所示。尽管该方法会导致更高的设备成本，但是它在全光子网之间提供了清晰边界，使故障定位与识别更容易。每个全光子网只包含某一销售商的设备。例如，一个子网可能只是一条有一些中间上路/下路的 WDM 链路。因此，业务提供商可以在一条链路上配置销售商 A 的设备，而在另一个链路上配置销售商 B 的设备，并通过转发器实现互操作。转发器之间的接口可能是 SONET/SDH 接口，也可能是 OTN 接口，该问题将在 5.5.7 节中讨论。

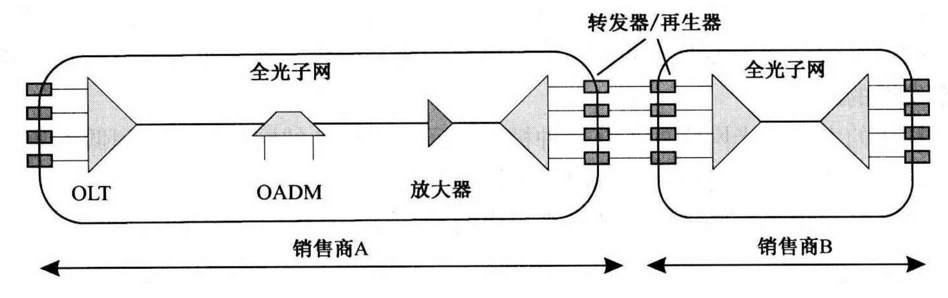


图 5.3　不同销售商的 WDM 系统之间的互操作性，其中显示了通过转发器/再生器实现不同销售商间的全光子网的互连

除了在数据层面上实现互操作性外，在相关的控制与信令协议上还需要获得互操作性，采用 5.6.2 节中所述的分布式方法更是如此。

5.5　性能与故障管理

如前面所述，性能管理的目标是使业务提供商能够为其网络用户提供服务质量保证。这通常需要监控网络所支持的所有连接的性能参数，并采取任何必要的措施来确保满足所要求的性能目标。性能管理与故障管理紧密相关。故障管理涉及网络故障的检测，并适当地通过告警来通知管理系统。如果正在监控某一参数且其数值超出预设范围，则网络设备将产生一个告警。例如，可以监控输入信号的功率水平，如果发现功率水平低于某一阈值，则生成一

个信号丢失(LOS)告警。在其他情况下，可能由完全失效而触发告警，如系统的线卡或其他器件故障。

故障管理还包括当故障发生时的业务恢复，该问题将在第6章中详细讨论。该功能通常认为是自动网络控制功能，因为这是不需要网络管理干预的典型的分布式应用(除了预先配置各种保护参数、上报故障和实施维护作业外)。

5.5.1 透明性的影响

光层所提供的光路需要像管理SONET和SDH连接那样进行管理。所提供的管理量很大程度上依赖于光层所提供的透明性等级。如第1章所述，基于信号变化幅度、比特率和光路所承载的协议等情况，透明性可能存在不同的等级。

在完全透明的网络中，光路能够承载任意比特率与协议格式的模拟和数字信号。这是光网络乌托邦式的设想，其允许业务供应商提供的业务范围不受任何约束，并在业务随时间变化或增加新业务情况下经得起未来的考验。但是，这种网络难以设计与管理。难以设计是因为网络设计中所必须考虑的各种物理层损伤主要依赖于信号类型(模拟与数字)和比特率。难以管理是因为管理系统无法预知网络所采用的协议和比特率。因此，不可能通过访问传输数据的开销比特来获得性能相关的测量，从而难以监控误码率。光功率电平和光信噪比等其他参数可以测量，但是这些参数的容许值依赖于信号类型。除非光路所承载的信号类型告知了管理系统，否则无法确定所测量的功率水平和信噪比是否处于容许限度范围内。

作为另一种极端，可以设计一种网络，它承载固定比特率(比如，2.5 Gb/s或10 Gb/s)和特定格式(比如，仅有SONET)的数据。这类网络的构建与管理是非常有成本效益的。然而，采用单一网络基础设施不能给业务提供商提供他们所需的传送多种业务的灵活性，也完全不符合未来发展的趋势。

当前构建的大多数光网络处于这两种极端之间。所设计的网络旨在处理低于某一特定最大值(比如，10 Gb/s)下的任意比特率的数字数据，以及如SONET/SDH与OTN等多种协议格式。这些网络利用了一些独特的技术来提供管理功能，具体内容参见以下相关各节。

5.5.2 BER测量

误码率(BER)是与光路相关的关键性能属性。当电域信号有效时，通常在再生器或转发器处才能检测BER。如第3章所述，SONET、SDH和OTN所采用的成帧协议包括开销字节，其中部分开销由奇偶校验字节构成，通过这些奇偶校验字节可以计算出BER。这样就提供了一种直接测量BER的方法。只要采用SONET/SDH或OTN开销来封装客户层信号数据，就可以测量BER并在光层内保证其性能。

鉴于光物理层设计的复杂性，难以通过间接测量光信号功率或光信噪比等参数来准确估计BER。这些参数可被用来提供某种程度的信号质量，并可作为如维护或可能的保护倒换(例如，可以基于功率丢失和信号检测)等事件的触发器，但不能测量BER。

5.5.3 光路踪迹

光路通过多个节点，并通过每个节点设备内所配置的多个线卡。最好是有与每个光路相关联的唯一标志符。例如，该标志符可以包括始发网元的IP地址，以及光路终端网元内的转

发器卡实际标志。这样的标志符称为光路踪迹。该踪迹使管理系统能够识别、核实与管理光路的连接性。当错误连接发生时还能够提供实施故障隔离的能力。

联想到踪迹信息还可以用于客户层，SONET/SDH在其段开销与通道开销中有踪迹信息，OTN在其OTU与ODU开销中也有踪迹信息。将在5.5.7节中看到不同的承载踪迹信息的方法。

5.5.4 告警管理

网络中的单一故障可以造成整个网络产生多个告警，为响应该故障状态会采取错误的操作。特别考虑一个简单的例子，当一个链路出故障时，该链路上的所有光路都不能工作。在故障链路末端的节点上可以检测到该故障，于是该节点对每条光路发出告警并上报整个链路瘫痪。此外，光路所穿过的所有节点都可以检测到该光路故障并发出告警。例如，在一条链路上有32条光路的网络中，每个光路穿过2个中间节点，某一链路的故障可以触发129个告警(其中，链路故障有1个告警，光路相关的节点中每个节点上的每条光路有4个告警)，显然，这种情况下，管理系统的任务是上报单一源告警(即链路故障)并抑制其余128个告警。

可以采用一组称为前向缺陷指示符(FDI)和后向缺陷指示符(BDI)的专用信号来实现告警抑制。图5.4描述了FDI和BDI信号的运行。当一条链路出故障时，故障链路的下行节点检测到故障，并产生一个故障状态。比如，由于输入信号的高误码率或完全光丢失而产生一个故障状态，如果故障持续一段时间(一般为数秒)，则该节点将产生一个告警信号。

一旦检测到一个故障，该节点将插入一个下行FDI信号传至其下一个节点。FDI信号迅速传播，更多的下行节点将接收到FDI信号并抑制其告警。FDI信号也称为告警指示信号(AIS)。检测到故障的节点也同时向其上一个节点发送一个上行BDI信号来报告该节点故障。如果其上一个节点没有发出FDI信号，则可以确定其下行连接到下一个节点的链路已经瘫痪。

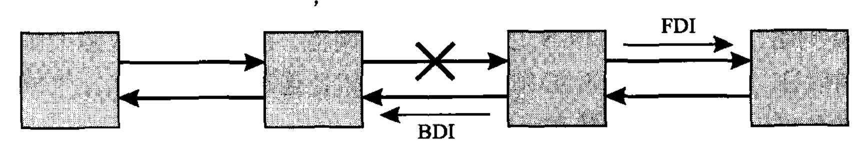


图5.4 FDI和BDI信号及其在网络中的应用

还请注意，光层中的不同子层需要独立的FDI和BDI信号，例如，用于区分链路故障与单一光路故障，或用于区分放大器之间链路段故障和整条链路的故障。图5.5说明了OTN网络中不同的指示符信号可能的用途。假设图中OLT A与放大器B之间有一条链路中断。放大器B检测到该中断故障后，立刻插入一个下行OMS-FDI信号来指示其复用波长组的所有信道已经失效，同时还插入一个上行OTS-BDI信号到OLT A。OMS-FDI作为OMS层中相关的部分开销来传输，而OTS-BDI作为OTS层相关的部分开销来传输。

需要注意，OMS-FDI是下行传输，而OTS-FDI不是。这是因为故障信息需要向下行传播，一直传播到OMS层终结的网元(该情形为OADM D)。下游放大器C接收到OMS-FDI并继续下传，下一个下游节点OADM D接收到OMS-FDI并判定其输入链路的所有光路都已失效。一些光路在本地下路而其他光路直通继续传输。对每个续传光路，OADM都产生OCh-

FDI 并向下行发送。OCh-FDI 以 OCh 部分开销来传输，在全光子网的末端(即 OLT E)，波长被解复用并终接于转发器/再生器，因此 OCh 层在此终止。OLT E 接收到 OCh-FDI，于是对每个失效的 OTN 连接都产生 ODU-FDI 指示符，并作为 ODU 部分开销向下行发送至每个连接的终点。最终，发布告警的唯一节点是节点 B。

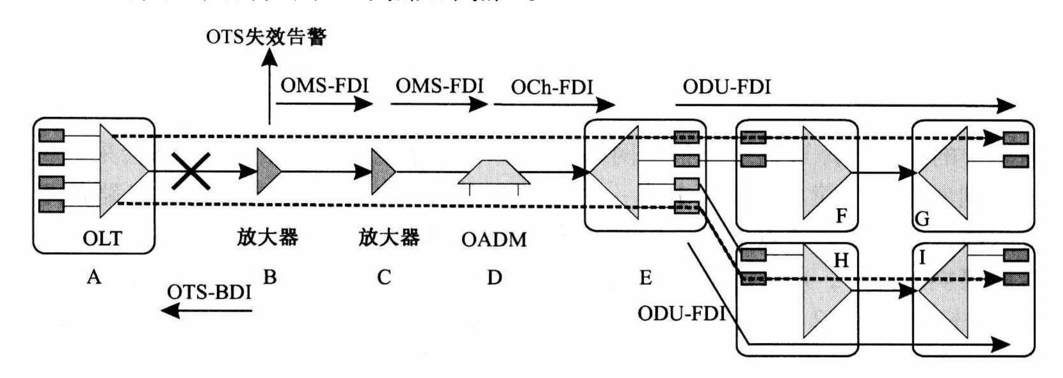


图 5.5　网络中采用的分层缺陷指示符信号，其中缺陷指示符用于 OTS、OMS、OCh 和 ODU 子层

采用缺陷指示符信号的另一个主要原因是故障用于触发保护倒换。例如，紧邻故障的节点检测到故障，可以触发保护倒换机制，以在故障周围重新选择路由流量。与此同时，故障处的其他下行和上行节点会认为其他链路也已失效，也会决定重新选择路由流量。接收到 FDI 的节点知道是否应该启动保护倒换。例如，如果保护倒换方法要求紧邻故障的节点立即启动重选路由，则接收到 FDI 信号的其他节点将不会启动保护倒换。另一方面，在光路的终端节点已经实施了保护倒换情况下，如果接收到 FDI 的节点是其相关光路的端节点，则该节点将启动保护倒换。

5.5.5　数据通信网与信令

网元管理系统(EMS)通过数据通信网(DCN)与不同网元通信。DCN 通常是一种标准的 TCP/IP 或 OSI 网络(见第 3 章)。DCN 必须是可靠的网络，在网络中有故障的情况下也可以连续传送控制信息。这意味着 DCN 必须具有足够的拓扑连通性，使之在发生故障后还能够保持连通。DCN 可以采用如下几种方式来传送。

1. 在光层外通过一个独立的带外网络。运营商可以利用其现有的 TCP/IP 或 OSI 网络来实现该目标。如果没有这类网络，可以采用专用租赁线路来实现。对中心局(其连通性容易实现)内的网元，该方案是切实可行的，但是对偏远的机房内的网元(如光放大器)，该方案是不可行的。
2. 通过一个独立波长上的光监控通道(OSC)(见 5.5.7 节)。在可以使用处理光传输段和复用段层的 WDM 线路设备情况下，该方案可行，因为此时可以建立和运行光监控通道。例如，采用该方法可以管理光放大器，但是该方案不适用于仅考虑光路层的设备，如光交叉连接设备。
3. 通过速率保持带内光信道层开销技术(见 5.5.7 节)。该方案可以用于只考虑光信道层而不处理复用段层与传输段层的设备，如光交叉连接设备。也可以用于只在电域处理光路的场所，即再生器处或转发器处。

表5.1中总结了各种类型网元情况下不同DCN方案的适用性。假定OADM是含有OLT和放大器的线路系统的一部分。由于OSC的特定性质，通常只有线路系统内的网元才能访问光监控通道。

表5.1 不同网元的DCN不同实现方式，假定OADM在上下路信道有转发器，但直通信道没有转发器

网 元	带 外	OSC	速率保持开销
有转发器的OLT	是	是	是
OADM	是	是	是(对下路信道)
放大器	否	是	否
有再生器的OXC	是	否	是
全光OXC(无再生器)	是	否	否

除了DCN之外，在许多情况下，网元之间还需要一个快速信令网络。这使网元之间能够实时交换关键信息。例如，FDI和BDI信号需要快速传播到光路沿途的节点。该类型的其他信号包括网络实现快速保护倒换所需的信息(即第6章的主题)。就像DCN一样，信令网络可以采用专用带外连接、光监控通道或通过某种开销技术来实现。

5.5.6 监控

管理系统的其中一个功能是监控波长和网络输入信号的功率水平，以保证其满足网络所规定的要求。如上面所述，可接受的功率水平依赖于信号类型和比特率。信号类型与比特率由用户来指定，然后网络为每一种信号类型的参数设置合适的阈值，并相应地予以监控。这包括触发告警所必需的参数阈值，该阈值依赖于数据速率、波长及沿光路路径的特定位置，参数的劣化依据参数的初始值来度量。

另一个更重要的功能是，监控用户正在使用的实际业务。例如，业务提供商利用租赁连接到用户的透明光路来选择两种业务，如千兆以太网业务和OC-192业务。这两种业务可以有不同的定价。对完全透明的网络，难以限制选用千兆以太网业务的用户发送OC-192业务。这意味着对基于波长租赁的业务会基于所规定的最大比特率来定价，同时允许其用户可以发送任何最大比特率以下的信号。

5.5.7 光层开销

支持光路踪迹、缺陷指示符和BER测量需要使用光层中某种形式的开销。先前已经间接地提到了一些这类开销，例如，利用SONET/SDH开销来测量BER和利用光监控通道(OSC)来承载一些缺陷指示符信号。本节中将描述承载光层开销的四种不同的方法。图5.6中画出了这些方法，而表5.2对这几种方法进行了比较。导频方法和光监控通道可以用于全光子网中承载开销信息。在每个子网边界上，可以通过先转换到电域进行信号再生(3R)，再转换回光域。速率保持开销方法可以用于通过多个全光子网在整个光网络运送开销信息。

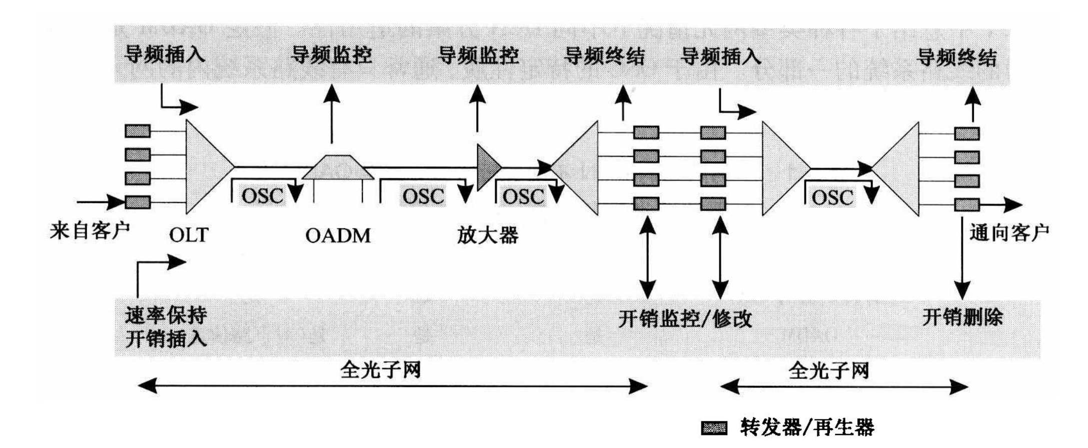


图 5.6 不同类型的光层开销技术。其中，OSC 采用逐跳传送方式；导频信号从发射机插入，在全光子网的网元处可以监控导频信号，直到在某一接收机终结；速率保持开销采用端到端方式，通过中间再生器穿越多个子网

表 5.2 不同光层开销技术的应用。不同的技术应用于光层内不同的子层，即光传输段(OTS)层、光复用段(OMS)层或光信道(OCh)层。表中还有OTN的电域子层，即光信道传送单元(OTU)子层和光信道数据单元(ODU)子层。踪迹与缺陷指示符(DI)信号在多个子层定义。注意，尽管表中没有描述，SONET/SDH不使用开销字节也能够实现速率保持开销

应　用	全光子网		端到端
	OSC	导　频	速率保持
踪迹	OTS	OCh	OTU
			ODU
缺陷指示符	OTS	无	OTU
	OMS		ODU
	OCh		
性能监控	无	光功率	BER
客户信号兼容性	任意	任意	任意

导频或副载波调制开销

这里，开销可以采用另一个副载波信号调制光路的光载波(波长)来实现，该信号有时也称为导频。只要保证该信号的调制深度相对于数据较小(通常为 5% ~10%)，并仔细地选择副载波频率，该方法相对于数据没有影响。导频的本身是低速率(比如，每秒几千比特)的幅度调制或频率调制，用于承载附加的开销信息。

在中间位置上可以分出一小部分光功率，不需要接收和重传整个信号就可以提取导频。注意，从承载所有波长的复合 WDM 信号就可以提取每个波长的导频，而不需要在每个波长解复用后再提取。

导频频率需要仔细地选择。首先，它与数据带宽交叠应该最小。例如，承载 2.5 Gb/s SONET 数据的光路，具有相对小的频谱分量(低于 2 MHz)，插入 1 ~2 MHz 范围内的导频对数据影响最小。导频频率还需要设置在 EDFA 的增益调制截止频率之上，通常在 100 kHz 左

右(见 2.4.3 节)，低于该截止频率的导频将导致放大器增益随导频幅度变化，使这种调制强加到其他信道，成为讨厌的“幽灵”导频或串扰。导频频率还可选择在数据带宽之上，比如，在该例中超过 2.5 GHz，但是在更高频率上处理信号比在较低频率下处理信号更昂贵。

导频方法的优点是成本相对便宜，且不需要知道信号的实际协议或比特率就可以监控透明网络的开销。其缺点是不能用于监控 BER，并且只能在发射机或再生器上修改导频，而在中间节点上则不能。因此，导频可以用于再生器之间透明子网内的 OCh 踪迹功能，但不能用于在没有再生器的中间节点上插入 FDI 和 BDI 信号。踪迹功能可以采用导频以几种可能的方式来实现。例如，每条光路可以有一个唯一的导频频率，其本身就可以充当踪迹。或者每个波长可以具有唯一的导频频率，导频可以采用包含一个唯一光路标志符的数字信号来调制。

光监控信道

在有线路放大器的系统中，一个独立的 OSC 用于传送监控链路沿线有关放大器状态的信息，尤其是对不可能采用其他直接方法访问的链路远端放大器的情形。OSC 也可以用于控制线路放大器，如在测试中开启与关断放大器。OSC 还可以用于承载 DCN 及一些开销信息。

OSC 采用一个波长来承载，但不同于承载业务所用的波长。在每一级放大器，要与其他波长分离，并接收、处理与重传，如图 5.7 所示。

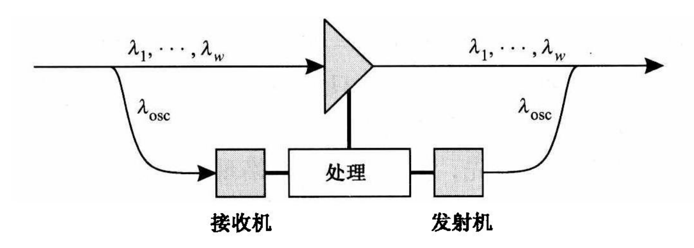


图 5.7　终结于每个放大器的光监控通道

准确选择 OSC 的波长涉及一些折中因素。图 5.8 描述了网络中承载业务、用于泵浦掺铒放大器或拉曼放大器及承载 OSC 的各种波段的用法。OSC 波长可以设置在与携带业务信道相同的波段内，也可以设置在远离携带业务信道的一个独立波段上。对后一种情形，通过每个放大器上的 OSC 波长能够更容易滤出与再插入，但是在采用拉曼泵浦的系统中 OSC 波长的位置需要远离拉曼泵浦波段。

OSC 波长可以设置在与携带业务的信道相同的波段上，其唯一的优点是放大器噪声可稍微降低。例如，如果采用两级放大器设计，则在第一级放大器后可以将带内 OSC 连同出现在该波长上的放大器噪声一起滤出。

对运行在 C 波段的 WDM 系统，OSC 波长通常选择 1310 nm、1480 nm、1510 nm 或 1620 nm。采用 1310nm 波段的 OSC 就不能再使用该波段来承载业务。考虑采用 1480 nm 波长只是因为容易获得该波长的激光器，但其可能正好落在 EDFA 的一个泵浦波长上。因此，由于同样的原因，OSC 激光器和 EDFA 泵浦之间可能存在某些不利的影响，所以这不是一种常用的选择。

通过这些权衡之后，ITU 已经采用 1510 nm 波长作为首选波长，该波长位于 EDFA 通带外，与 EDFA 泵浦波长不一致，并处于 C 波段与 L 波段之外。但是，要注意该波长处于 S 波段，也可能与用于 L 波段的拉曼泵浦重叠。

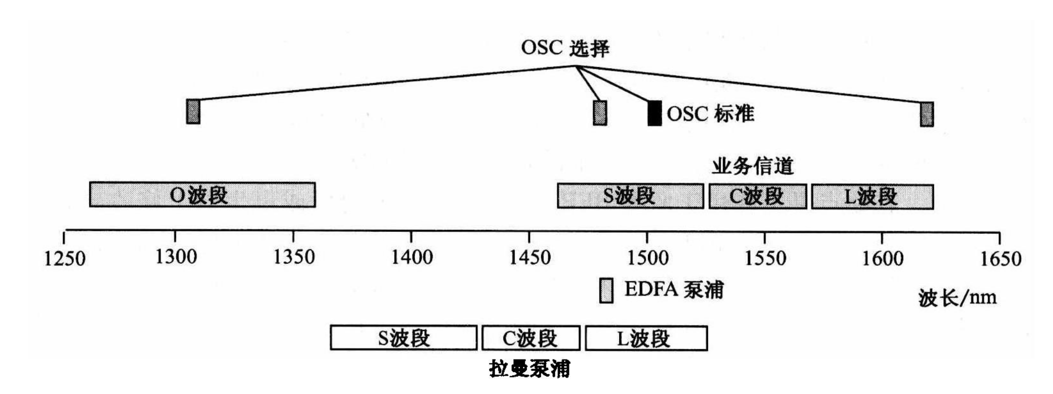


图 5.8 网络中波长的用法，其中，承载业务采用 O 波段、S 波段、C 波段或 L 波段,在采用拉曼泵浦系统中,其泵浦波长应该低于信号波长80～100 nm

然而，一些销售商采用的另一种选择是位于 L 波段外缘的 1620 nm 波长。这样的选择避免了上述问题，但必须小心该信道与 L 波段边缘的携带业务信道分离。

OSC 可以用于承载 OTS 踪迹与缺陷指示符，以及 OMS 与 OCh 缺陷指示符。

速率保持开销

这种想法利用了现有的 SONET/SDH 和 OTN 开销。在 SONET/SDH 情形下，该开销包括目前尚未使用的一些字节。光层可以使用其中一些字节，还可以利用一些字节用于增加前向纠错(FEC)，以提高光层链路的预算。该技术只能用于电域信号可用的场合，即再生器或网络边缘。与导频方法不同，它不能用于透明光子网内。

此方法的优点有以下几种。首先，它可以用于网络现有的设备中。例如，通过网络现有的 WDM 和 SONET 中间设备，具有该功能的一个新网元可以与相同类型的其他网元通信。其次，它保持了 SONET/SDH 标准中现有的比特率等级，使现有的 SONET/SDH 系列芯片，如时钟恢复电路、接收器、调制器和开销处理芯片等仍然可以使用，而无须开发一套新器件来支持新速率。

该方法的缺点如下:首先，可用的未使用字节数量有限，不能提供足够带宽来承载所有的光层开销和 FEC。其次，尽管 SONET/SDH 标准规定了一套未使用的字节，但是一些销售商因其本身独自占有的原因已经使用了其中一些字节，难以确定哪些字节是真正未使用的字节!

OTN 解决了利用 SONET/SDH 开销的问题。它有内置的前向纠错。也可以用于封装各种不同的信号，如光纤信道、千兆以太网和 10 千兆以太网。它有光信道传送单元(OTU)和光信道数据单元(ODU)的踪迹与缺陷指示符，并能提供其他的开销用于管理，如发生故障时网元之间信令的自动保护倒换(APS)协议所用的开销。OTN 帧也有未使用开销字节，可以用于承载附加的开销信息。

5.5.8 客户层

下面描述在第 3 章所讨论的客户层协议中的一些性能与故障管理功能。已经讨论过 SONET/SDH 和 OTN 电层的性能与故障管理机制。由于 SONET/SDH 和 OTN 提供固定比特率业务，这类业务采用误码率(BER)及信号丢失作为性能指标指标。网元由缺陷指示符来获悉错误与故障事件(见 5.5.4 节)。它们在其开销里也有踪迹信息。

提供分组传送业务(如以太网或 MPLS)的协议有面向分组的性能指标,如丢包率、包延时和包延时变化(抖动)。为了检测连接(链路或通道)是否工作,通过两个终端节点之间的连接定期地发送"hello"或连续性检验信息。如果没有接收到这些信息,则可以判定连接已经中断。链路一端利用远端缺陷指示符(RDI)和 AIS 信号来通知其另一端:它已经检测到一个故障或错误。于是,产生不同级别的管理。最低等级管理是对单条链路进行管理,而最高等级管理是对端到端连接进行管理。中级管理可以是对端到端连接的段进行管理,如穿越过另一个网络运营商的一个段。此外,端到端的管理可以是面向客户的,也可以是面向业务提供商的。

5.6 配置管理

把配置管理分为三个部分:网络设备管理、网络连接管理和客户层信号到光层的适配管理。

5.6.1 设备管理

一般情况下,光网络设备管理的原理与其他高速网络设备管理没有不同。必须能够掌握系统中的实际设备(例如,光线路放大器的数量与位置),以及每个网元中的设备及其功能。例如,在点对点 WDM 系统的一个终端中,可能想掌握其最大波长数量和当前配置了的波长数量、是否有光前置放大器和功率放大器等。

网络设备设计的考虑因素是,应该能够以模块化方式将这些设备添加到现有设备中。例如,应该能够添加额外的波长(直到所允许最大数量)加入系统而不干扰已有波长的运行。理想情况下,一条信道出故障不应影响其他信道,对出故障的信道的维护修理也不应该影响其他信道。在这点上出现的一个问题是阵列多波长器件与每个波长独立器件的使用,如多波长激光器阵列替代每个波长单独激光器。采用阵列器件可以降低设备成本与空间,但是如果阵列中的一个器件失效,则整个阵列必须更换。这将降低系统的可用性,因为阵列的更换将会干扰多个信道的运行而不仅仅是单一信道。采用阵列还增加了模块更换成本。因此,需要在降低成本和占用空间及系统可用性和更换成本这两方面之间进行均衡。

也可能要在开始时配置点到点链路方式的设备,以后再升级到环或其他网络结构。可能还希望设备特定接口卡与特定波长之间具有灵活性。例如,系统最好能够任意地选择接口卡的发送波长,而与其所在槽位无关。

WDM 系统的另一问题是需要维持特定波长备用线卡的库存。例如,每个信道可以采用特定波长激光器线卡来实现。因此,需要为每个波长储备备用线卡。该问题可以通过在每个线卡上配置波长可选择(即可调)激光器替代某一特定波长激光器来解决。

5.6.2 连接管理

光网络为用户提供光路,或更一般地说,是提供电路交换连接。连接管理涉及连接建立、保持对它们的跟踪和任何不需要时将连接拆除。

传统的通信方式提供这种功能是通过一个集中式管理系统,或更准确地说,是通过一套

系统。然而，这个过程非常烦琐和缓慢。它通常涉及配置多个销售商的设备，每个销售商的设备都采用其自己的管理系统，通常每次只能配置一个网元。此外，管理系统之间的互操作性虽然可行，但实际上难以实现。最后，许多情况下业务提供商只有在需要时才会配置设备。最终导致业务提供商为响应用户请求而开通一个新连接可能需要数月时间。对于这一事实，其实这并不奇怪，因为一旦建立了连接，它将保持相当长的时间，从数月至数年！

随着光网络的演进，连接更加动态，而网络也更大、更复杂。业务提供商希望为其用户快速地提供连接，最好在几秒钟到几分钟，而不再强求承诺长期保持这些连接。换言之，用户将按需预约带宽。

支持所有这些功能需要运营商在网络中预先配置设备(和带宽)，并且当有需求时采用合适的方法快速开通业务。这将成为鉴别运营商之间竞争力的一个重要问题。这种运营方法也刺激了所谓的带宽交易，运营商们将其未使用的带宽与其他运营商们进行交易的周期缩短，以改善其网络的利用率，并使其收益最大化。

分布式控制(Distributed Control)

对于上面所给出的理由，可见连接管理更趋于分布式控制。分布式控制协议已经应用在IP/MPLS和以太网中。它们在标准化和实现跨销售商边界的互操作性方面相当成功。这些协议也可以再用于光网络的控制与管理。支持光连接的通用多协议标记交换协议(GMPLS)就是一个例子。GMPLS开发者承认标记交换路径(LSP)是虚电路交换路径。LSP的大部分控制与管理可以用于任意电路交换连接，如TDM连接、波长交换连接(即光路)或光纤交换连接。因此，标记交换路径，不是标记的路径，而将是一条通用标记的路径(如时隙、波长或光纤)。

自动交换传送网(ASTN)是一种包括光连接在内的连接管理体系结构。其目标与GMPLS类似，但是，当GMPLS发展到实现光网络的阶段时，ASTN仅发展到体系架构阶段。因此，可以认为ASTN是一种自上而下的方法，而GMPLS是一种自下而上的方法。

分布式连接控制分成如下几部分。

拓扑管理。网络的每个节点维护一个网络拓扑数据库，当前可用资源及已用于支持业务的资源。当网络发生任何变化时，如链路容量变化，则已更新的拓扑信息需要传播到所有网络节点。为此，可以采用IP网络已采用的同样技术来实现。当网络节点定期或出现变化时，向所有节点发送已更新的信息。可以采用互联网路由与拓扑管理协议，如开放最短路径优先协议(OSPF)或中间系统到中间系统的路由选择协议(IS-IS)(见3.5节)，进行适当修改来表示光层拓扑信息，它会自动更新。基于流量工程的开放最短路径优先协议(OSPF-TE)和基于流量工程的中间系统到中间系统的路由选择协议(IS-IS-TE)是OSPF和IS-IS增强版本，包括了链路属性，如可用带宽等属性在内。

如前所述，定期发送“hello”或通过链路端口连续性检验信息，节点可以监控其链路。只要接收到这些信息，节点就可以判断链路正在运行。节点可以通过这些信息来发现当前相邻的节点。这些信息还可以承载链路属性，如可用带宽和时延。如上所述，通过向网络发送信息，节点可以与其他节点一起共享它们的链路状态信息。

网络管理员可能需要知道穿越多条链路的端到端连接状态。互联网包探索器(Ping)或环回信息可以从连接的一端发送，在连接的另一端返回。这些信息用于验证连接是否仍然在运行，也可以用于故障发现与排除。同样，踪迹路由或链路踪迹信息可以从连接的一端发送，

以发现连接路径。该路径是连接的链路或节点的一份列表。当采用分布式方式来计算路径和集中式数据库不可用时，这对网络管理员是很有用的。即使存储了路径信息，踪迹路由或链路踪迹还可以用于验证路径。

链路管理。如上面所述，链路状态的监控可以采用定期的“hello”或连续性检验信息来实现。此外，链路性能可以通过统计数据包丢失和误码率来监控。如果性能等级低于可接受的阈值，则发送一个失效指示信号到链路的另一端。当性能劣化到表明即将发生故障时，也可以发送一个失效指示信息。因此，早期预警使链路在故障之前就能够切换到备用链路。

网络还允许链路捆绑，即其中两个节点之间的多个并行信道像单条逻辑链路一样运行。这将减少路由协议和跟踪网络拓扑的开销。因此，末端节点必须能够管理信道，包括信道的建立与拆除、数据映射到信道，以及支持路由与资源的分配。GMPLS 的链路管理协议(LMP)就是其中一个例子。

路由计算。当网络请求一个连接时，网络需要寻找一条路由，并获得路由沿途的资源，以支持该连接。这可以在网络拓扑数据库中应用路由算法来实现。路由算法应该考虑网络所规定的各种限制，如网络的波长转换能力和每条链路的可用容量。在容量的可用性情况下，最小可用容量及最大可用容量可能是一种限制。例如，链路可能是一组波长。如果考虑通过链路来建立一条光路连接，则波长容量就是链路的最小可用容量，因为光路使用了链路内所有的波长。除了计算承载工作流量的路由之外，算法还必须计算该连接的用于故障发生时的连接保护或备用路由。路由计算问题将在 7.2.2 节中讨论。

信令协议。一旦计算了路由，就需要建立连接。该过程涉及预约连接所需的资源和设置网络内的实际开关来建立该连接。该过程需要节点与其他节点交换信息。连接的宿或源通常向沿连接通道的每个节点发送信号来实现这一功能。基于 MPLS 互联网信令协议的那些协议，如 RSVP 和 LDP(见 3.5 节)可以用于这一目标。它们不用考虑链路属性，如可用容量，就可以为连接建立路径。此外，还可以沿最短路径建立连接。扩展的资源预留-流量工程协议(RSVP-TE)和基于被约束路由标签分配协议(CR-LDP)可以考虑链路属性，并允许显式路由的路径(见 3.6.3 节)。由信令协议发送的信息(如链路属性)通常采用类型-长度-值(TLV)格式。

当连接不再需要时，同样的协议也能用于拆除连接。在对 IP/MPLS 和基于 GMPLS 网络体系架构中，连接存在一种“软状态”。这意味着连接有寿命期，并且当连接在使用期间，其寿命随着刷新信息的发送定期更新。中止刷新信息的发送将最终导致信息超时而终止连接。

建立或拆除连接的过程必须周密地执行。例如，如果简单地拆除源与宿的连接，则中间节点就会出现该连接的光丢失信息，并作为一个故障连接，从而触发不必要的告警和保护倒换。通过适当地协调沿光路路由的节点即可以避免出现该问题。

GMPLS 是支持建立光路的 MPLS 增强版。鉴于 MPLS 为建立单向 LSP 而设计，GMPLS 可以建立双向 LSP。这点很重要，因为大部分光路是双向的。此外，GMPLS 允许上游节点对标记类型或通用标记加上限制，通用标记可以应用于在下一链路上或整个路径上建立 LSP。这可以应用于对波长转换有限制的光路建立，以及当建立一个 LSP 时，可以规定一个专用的输出端口。

信令网络。节点需要一条信令信道，用于与其他节点交换控制信息。

与其他层的交互

连接管理协议的一个重要方面是协议与光层的客户层如何交互。随着 IP 路由器作为光层的主要客户层，并由于光层控制协议基于互联网协议，这些协议特别是与 IP 层如何交互的问题成为了关键问题。

不同的场合可能需要不同类型的交互，如城域网与长途网之间、传统业务提供商与新型业务提供商之间、多业务提供商与 IP 业务为中心的提供商之间，以及设备拥有商与设备租赁商之间等。

图 5.9 描述了客户层与光层如何交互的几种模型。图 5.9(a)是重叠模型，其中光层有它本身的控制面，更高层有它本身的独立控制面。光层给用户提供了网络接口(UNI)，通过 UNI 更高(客户)层可以提出与光层连接的请求。在光层内，不同的子网可以通过标准化网络间接口(NNI)实现互连互通。该方法使光层的连接控制软件能够专门针对光层来进行调整，而不必担心制定一个统一的控制软件。该方法还可使光层和客户层独立地规划与演进。光网络拓扑结构的详细信息可以通过 UNI 从客户端层隐藏。可以使用该模型让各种客户层，包括 IP 客户层、以太网客户层和 SONET/SDH 客户层，实现与光层的互连。该模型还适用于支持专用线路光路业务、传送带宽代理、运营商载波中继和光虚拟专用网。最后，该模型还可以应用于拥有或者租赁传送设备的传统多业务运营商或新型多业务运营商。

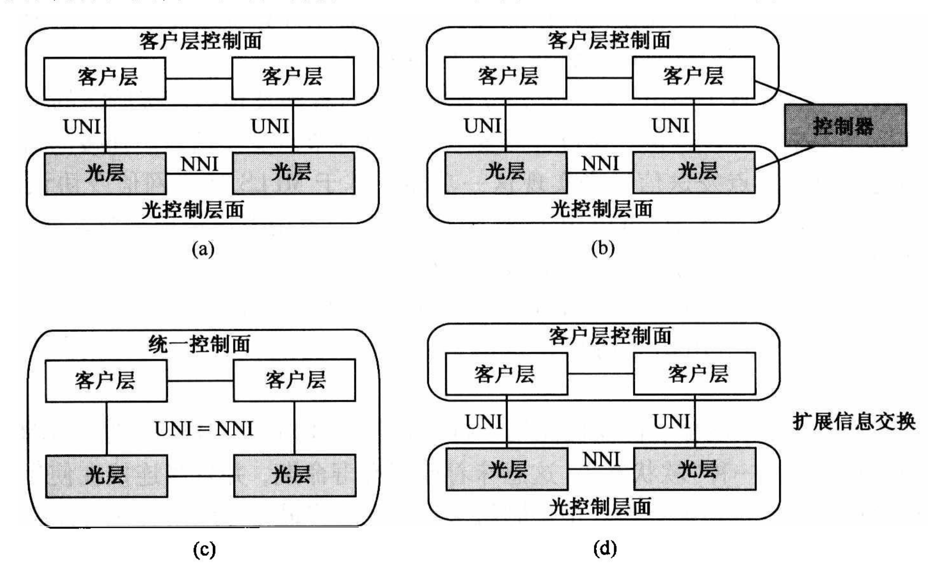


图 5.9　客户层与光层互连的不同控制面模型。(a)重叠模型；(b)重叠$^{+}$模型；(c)对等模型；(d)扩展模型

重叠模型的一种加强型版本是重叠$^{+}$模型，如图 5.9(b)所示，它使层间交互更紧密。对于该情形，两层之间有一个可信的中间智能控制器，这两层具有可用的特定客户层和光层拓扑与状态信息的适当的抽象版。控制器可以基于特定策略，如在客户层与光层之间制定的特定业务等级协议，利用这些信息来请求建立与释放光路。这些请求可以快速地激活，以避免网络异常情况，如阻塞与故障，以增加基础设施利用率、协调保护与恢复选项，以及通过重新均衡网络与预测所需资源(如节点与链路容量)来为 IP 层和光层的自动工程升级。

图5.9(c)描述了对等模型，其中IP路由器与光层单元，如OXC和OADM，运行相同的控制面软件。它将使路由器看OXC就像它们就是路由器，有效地对等处理IP层与光层。OXC可以简单地看做是一种特殊类型的路由器，类似于标记交换路由器(LSR)。路由器对光层有完全的拓扑感知，因此可以直接控制光层连接。尽管这是一种简练的方法，但是由于下述原因使其变复杂了，因为与IP路由器相比，光层单元对连接的路由与保护明显施加了不同的限制。在这种情况下，需要找出一种方法，以便将光层路由的限制适当地抽象为可以被内嵌于IP路由器中的计算引擎所使用的一种格式。

图5.9(d)表明了另一种加强版的重叠模型，称为扩展模型，其中IP层可以访问光层的汇总路由、寻址和拓扑信息，但是仍然作为与光层分离的一个控制面来运行。

图5.9(c)和(d)所示的模型主要倾向于已拥有传送设施的新型的以IP为中心业务的提供商和以IP为中心业务的运营单位。与图5.9(a)和(b)的重叠模型相比较，这些模型明显允许(或要求)IP层与光层之间具有更可信与更密切的结合。

5.6.3 适配管理

适配管理功能是接受客户端信号并将其转换为光层可以使用的格式。该功能包括如下几个方面。

- 将信号转换为合适的波长、光功率电平和光层相关的其他光学参数。该功能可以采用转发器来实现，转发器将光信号转换为电信号，并采用特定的WDM激光器来重新发送信号。在另一个方向上接收WDM信号并把它转换为标准化信号，如短距离SONET信号。
- 添加和去除相应的开销，使信号在光层中能够得到管理。这些开销包括5.5.7节中所述的一种或多种开销技术。
- 监控客户信号，以确保客户信号处于业务协议范围内。该问题已经在5.5节中讨论过。

WDM网络必须支持不同类型的接口，以适应需要不同功能的各种用户。图5.10表明了可能有的不同适配接口。

1. **标准波长接口:**一个接口可能会允许客户端发送一个网络所支持的波长的光。对这种情形，要求用户遵循网络所设定的各种准则，如信号波长、功率、调制类型等。这些波长可视为标准波长。在这种情况下，接口是一个纯光学接口，不需要光电转换(显著节省了成本)。例如，你可以设想SONET或IP设备必须采用适合WDM网络的波长、具有WDM功能的激光器。也可能从WDM网络直接发送一个波长到SONET设备，这里，用户遵循网络所规定的要求。
2. **非标准的波长接口:**这是最通用的接口，并包括各种不同类型的连接客户端的设备，这些设备使用与WDM网络内部信号不兼容的光发射机和/或接收机。例如，包括采用1.3 μm激光器的SONET设备。在全光波长转换(以及可能还有全光再生)成为现实之前，必须采用光电转换(可能还有再生)来将信号转换为适用于WDM网络的形式。当需要将WDM设备与来自不同销售商的遵循不同规定的设备互连时，就可能采用这种接口，如5.4节中所述。

3. **子速率复用**：另一个适配功能包括在传输数据前在 WDM 设备内将低速数据流通过时分复用技术复用到高速数据流。例如，WDM 设备可以将 SONET OC-48 数据流复用到 OC-192 数据流。通过缩减通常用来实现该功能的独立设备，可以降低设备成本。

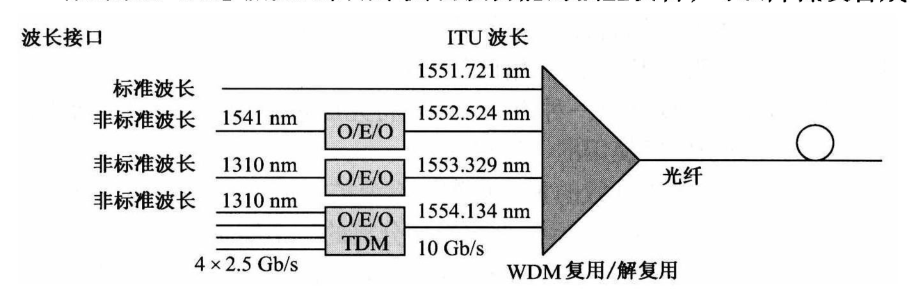


图 5.10 WDM 光网络与其客户之间的不同类型接口

网络所提供的透明性等级也影响到网络边界上所进行的适配类型。网络需要能够传送多种比特率。在一般情况下，可以设计光路来支持信号达到某一特定最大比特率。网络内所用的适配设备与再生器也需要能够支持多种比特率。用于此目的一个重要器件是一个可编程的时钟数据恢复芯片，该芯片可以设置在各种比特率下工作。当前，可用的这类芯片能够处理比特率的整数倍，也能够处理其平均值附近窄范围变化的比特率。例如，单一芯片可以处理 SONET OC-24 信号或千兆以太网信号，这两种信号约为 1.25 Gb/s，但速率并不完全相同。

5.7 光学安全性

光通信系统所用的半导体激光器是功率相对低的器件，然而其辐射还是可能造成人眼的严重伤害，包括永久性致盲与烧伤。激光器波长离可见光范围越近，其伤害程度就越大，因为角膜对更靠近可见光的波长更透明。因此，有激光器的系统必须遵循某些安全性标准。这类系统根据其辐射等级来分类，通信系统的相关分类在下面描述。在某些情况下，这些安全性问题可以限制系统中允许使用的光功率。

I 类系统不能发射损伤性辐射。激光器本身可能是一个高功率激光器，但是如果将激光器封闭在一个合适的环环相扣的外壳结构内，则可以防止其造成伤害。I 类系统的光纤最大限定功率在 1.55 μm 和 1.3 μm 波长下大约分别为 10 mW(10 dBm)和 1 mW(0 dBm)。此外，在单一故障状态下，设备的功率也不能超过这一水平。例如，典型的家用 CD 播放机就是 I 类系统。

IIIa 类系统允许更高的辐射功率，在 1.55 μm 波长范围可以达到 17 dBm，但只限于由训练有素的业务人员操作。IIIa 激光器辐射通常是安全的，除非把激光束聚集或聚焦到人眼上。IIIb 类系统所允许的辐射功率还要更高，不用聚焦或聚集的辐射就会造成对眼睛的伤害。

在正常条件下，光通信系统是完全“封闭”的系统，激光器辐射封闭在系统内，从外部无法看到。问题是在检修或安装期间，或者当一根光纤断裂时，这种情况下系统不再是完全封闭的，辐射功率必须保证低于系统特定等级所规定的水平。企业界所配置的通信系统通常必须符合 I 类标准，因为未受过训练的用户可能会使用这些系统。另一方面，在运营商网络中所配置的系统可能是 IIIa 类系统，因为对这些系统的操作通常被限制在那些训练有素的业务技术人员。

安全性问题从而限制了最大入纤功率。对采用半导体激光器而无光功率放大器的单信道系统，其辐射电平应足够小(通常在 -3 dBm 到 0 dBm 范围内)，这使我们不必过多担心激光器的安全性。但是，对 WDM 系统或使用光功率放大器的系统，必须时刻小心控制入纤总功率。

简单的安全性机制在网络设备上使用带遮板的光连接器。如果从设备拔出连接器，该机制负责控制辐射，但是不能防止来自设备光纤中断而产生的辐射。这些都由设计进网络设备中的各种自动关断机制来处理。这些机制一检测到连接断开就关断激光器和/或光放大器(放大器的自发辐射本身就可以大到足以造成伤害)。一些技术可用于实现该功能。如果放大器在其输入端发现信号丢失，则关断其泵浦激光器，以防止任何下行输出。在故障链路的两端需要一些握手信号，以处理单向中断。如果一端发现信号丢失，则关断其发射机或另一方向上的放大器。反之，另一端检测到信号丢失就关断其发射机或放大器。另一种技术是检查后向反射光。当一根光纤发生断裂时，后向反射会增强，可以用于触发关断机制。

在故障修复后，该系统可以用人工方法启动。更复杂的开放式光纤控制机制在故障修复后能使链路自动地恢复。这些机制通常在链路上定期发出脉冲，以判定链路是否已经修复。但是需要让脉冲功率低于安全性等级所规定的水平。下面将描述光纤通道标准已选用的一个特定协议。

5.7.1　开放式光纤控制协议

图 5.11 是采用开放式光纤控制协议(OFC)的 A 和 B 双节点系统的结构框图。图 5.12 是协议的有限状态示意图。

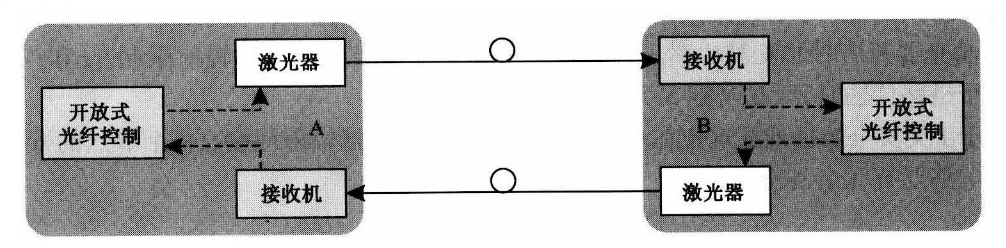


图 5.11　光纤信道标准中的开放式光纤控制协议

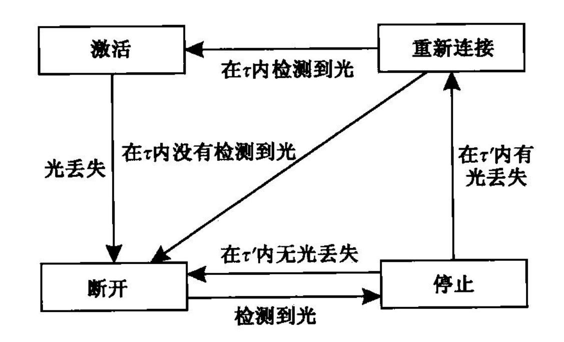


图 5.12　光纤信道标准中开放式光纤控制协议的每个节点运行状态示意图

协议按照如下方式运行。

1. 在正常工作状态下，A 和 B 处在激活(ACTIVE)状态，如果从 A 到 B 的链路出故障，则接收机 B 检测到光丢失信号并关断激光器 B，B 则进入断开(DISCONNECT)状态。随后接收机 A 检测到光丢失信号并关断其激光器，也进入断开状态。类似地，如果从 B 到 A 的链路出故障，或如果双向链路同时出故障，则 A 和 B 都进入断开状态。
2. 在断开状态下，A 每 T 秒发送一个持续时间为τ的脉冲。B 的做法也一样。如果 A 在其发送脉冲时检测到光，则进入停止(STOP)状态，称为主动；如果 A 在其不发送脉冲时检测到光，则发送一个τ秒脉冲，然后进入停止状态，称为从动。B 运行方式也一样。
3. 当进入停止状态时，节点在τ'秒时间内关断其激光器，并保持这种状态，直到在输入链路上检测到光丢失信号为止。如果在τ'秒时间内出现这种情况，将转移到重连接(RECONNECT)状态，否则转回到断开状态。
4. 当进入重连接状态时，如果节点是主动的，就发出一个持续时间为 τ 的脉冲。如果这段时间内在输入链路检测到光，则节点进入激活(ACTIVE)状态，否则将关断其发射机并进入断开状态。如果节点是从动的，就在 τ 秒时间内监控链路，如果这段时间内在输入链路检测到光，则开启其激光器并进入激活状态，否则将返回到断开状态。

这是一个相当复杂的协议。该协议的简易版没有停止和重连接状态，而是当检测到光时，节点直接从断开状态进入激活状态。对有其他状态的原因是试图确保两端节点都正常运行安全电路。如果一端节点在停止状态期间没有关断其激光器，则认为安全电路没有运行，另一端节点返回到断开状态。

为了协议的运行，必须细致地选择τ、τ'和 T。在断开状态下，平均发送功率为$\tau P/T$，其中 P 为激光器开启时的发射功率。它必须小于安全性等级所允许的辐射限制。τ和τ'值的选择依赖于链路传输时延(见习题5.5)。

由于 I 类安全性标准还规定在单一故障状态下必须保持辐射限制，每个节点的开放式光纤控制电路要有冗余备份。

总结

网络管理对任何网络的运行与维护是必不可少的。对于大多数电信网络，运营成本决定了设备成本，成功地实现网络管理对保证网络平稳运行是极其重要的。网络管理的主要功能包括(网络设备与连接的)配置、性能监控和故障管理。此外，安全与计费也是管理功能。大部分管理功能通过集中式管理系统体系结构来实现，但是某些功能(如故障的恢复或使用缺陷指示符来抑制告警)是采用分布式方式来实现的。已经有了一些管理协议，主要是 TL-1、SNMP 和 CMIP。

将光层划分为三个子层是非常有用的:光信道层涉及单一连接或光路，属于穿越网络的端到端应用；光复用段层涉及基于点到点链路的复用波长；光传输段层涉及在相邻放大器之间复用的波长与光监控通道。

光网络提供的透明性等级影响了可以执行的一些管理工作量。如误码率等一些关键性能

参数只能在电域进行监控。快速信令方法需要设置在网元间之间，以实现一些关键的管理功能。包括使用缺陷指示符信号来防止无用告警和保护倒换动作的发生，以及使用其他信令字节来控制快速保护倒换。光路踪迹是另一种可以用于验证与管理网络连接性的指示符。已有几种用于在节点间交换管理信息的方法，包括光监控信道、导频和利用 SONET/SDH 及 OTN 开销中的某些字节。

光网络的连接管理缓慢地从基于集中式管理面的方法，演进到更加分布式的连接控制面的方法，这些分布式连接控制面的方法所采用的协议类似于 IP 和 MPLS 网络所采用的协议。

对眼睛安全性方面的考虑是光纤通信系统的一个独特功能。这些考虑设置了从光纤开放一端辐射出功率的上限，这些限制使设计 WDM 系统更困难，因为这些限制适用于总功率，而不是每个信道的功率。安全性通过采用网络的自动关断机制来实现，该机制检测故障并关断激光器和放大器，以防止从系统发出的任何激光辐射。

进一步阅读材料

网络管理是一个庞大的主题，关于这一主题已经编写了几本书籍，如文献[Sub00、Udu99、Bla95 和 AP94]对该领域进行了很好的介绍，它包括各种标准的描述。文献[McG99、Wil00 和 Mae98]提供了光网络管理方面的综述。

目前，有很多标准机构对规范本章中所讨论的许多项目感兴趣。从事该领域的标准化组织有国际电信联盟(ITU)第 13、15 研究组(www.itu.ch)、美国国家标准学会(ANSI)T1X1.5 子委员会(www.ansi.org)、光互连论坛(OIF)(www.oiforum.com)、互联网工程任务组(IETF)(www.ietf.org)和 Telcordia 公司(美国卓讯科技公司)(www.telcordia.com)。国际电信联盟定义的标准，包括 SDH 和学层。国际电信联盟定义的标准包括了 SDH 和学层；ANSI 提供了北美体系到 ITU 的输入接口；IETF 是一个互联网标准组织，正在积极参与规定光层控制协议；OIF 作为一个讨论论坛为数据通信设备销售商、光联网销售商和业务提供商提供服务；Telcordia 规定了许多 SONET 标准；网络与业务互操作性论坛(NSIF)为促进 SONET 的互操作性规定了许多管理接口；本书在附录 C 中提供了一份相关标准文件的清单。

描述信号踪迹与监控的导频实现方法的论文选录请见文献[Hil93、HFKV96 和 HK97]。文献[Epw95]中使用导频来控制光放大器增益。

ITU G.709 规定了相关的 OTN 维护信号，如路径踪迹与缺陷指示符；Telcordia 的 GR-253 规定了 SONET 的等效信号集。

ITU [ITU01]正在开发 ASTN，从前称为自动交换光网络(ASON)[VSN+01]。

IETF 为 GMPLS [Int04]、LDP [ADF+01]、RSVP [BZB+97]和 RSVP-TE [ABG+01]提供了请求注解(RFC)。有许多关于这些主题的书籍，如文献[FB06]。分布式连接管理的一些早期研究请参见文献[CGS93]，光网络的相关研究请参见文献[RS97，Wei98]。有关各种类型的控制面模型方面的讨论还可以参见文献[GR00，AR01]。有关以太网的运行与管理方面的概述可以在文献[MSC05，RSPJ08]中找到。

一些标准包含了激光器安全性，包括 ANSI、国际电工委员会(IEC)、美国食品与药物管理局(FDA)和 ITU[Ame88、Int93、Int00、US86、ITU99、ITU96]。

习题

5.1 光层中哪个子层负责处理如下功能?

(a)在网络中建立和拆除光路。

(b)监控与修改光路中的数据封装开销。

(c)将一条故障光纤链路的所有波长重新路由到另一条光纤链路(光监控通道除外)。

(d)在 WDM 线路系统中检测光缆中断。

(e)检测某一单独光路出故障。

(f)检测光路中误码。

5.2 考虑如图 5.13 所示的运行在光层上的 SONET 网络。跟踪通过该网络的连接路径,并描述在每个网元上不同层的终结位置。

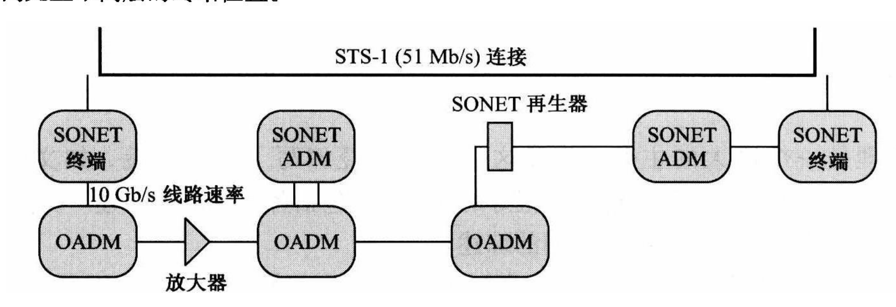


图 5.13 习题 5.2 中的 SONET/WDM 混合光网络

5.3 考虑如图 5.14 所示的网络,假设在 OLT A 与放大器 B 之间的链路段出故障。

(a) 设每个节点检测到光丢失需要 2 ms,在发送下行 FDI 信号之前要等待 5 ms;此外,在检测到光丢失之后至触发告警之前每个节点又需要等待 2 s;再设每个链路段(段定义为相邻放大器之间或 OLT 与其相邻放大器之间的一部分链路)的传输时延为 3 ms。画出出故障后网络中每个节点运转状态的时序,包括 OCh-FDI 和 OMS-FDI 信号的传输。

(b) 现设每个节点检测到光丢失需要 2 ms,并立刻发送下行 FDI 信号,在检测到光丢失之后至触发告警之前还要等待 2 s;又设传输时延值与前相同。重新画出出故障后网络中每个节点运转状态的时序,包括 OCh-FDI 和 OMS-FDI 信号的传输。

你观察到上述所提出的两种方法有什么差异?

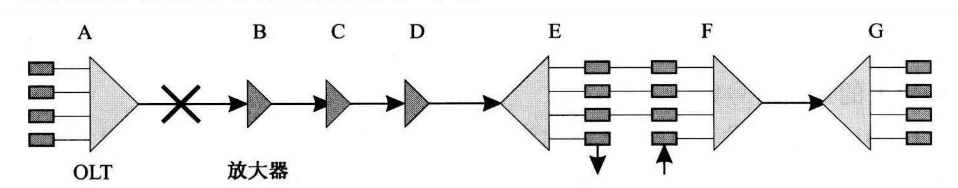


图 5.14 习题 5.3 中的例子

5.4 考虑与多个 OLT 连接的一个 OXC。

(a) 如果 OXC 有一个带有光电转换的端口的电交换核心,则它能采用何种开销技术?怎样与网络中其他同类 OXC 通信?可以监控哪些性能参数?

(b) 如果 OXC 是全光的,没有光电转换,则它又能采用何种开销技术?怎样与网络中其他同类 OXC 通信?可以监控哪些性能参数?

5.5 考虑光纤通道标准中的开放式光纤控制协议。

(a) 作为最大链路传播时延 d_{prop} 的函数，你如何选择参数 τ 和 τ'？

(b) 假设对一个成功的重连接，即永不返回到断开状态，一个节点从断开状态转换到激活(ACTIVE)状态所需的时间是多少？

参考文献

[ABG+01] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, and G. Swallow. *RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels*. Internet Engineering Task Force, Dec. 2001.

[ADF+01] L. Andersson, P. Doolan, N. Feldman, A. Fredette, and B.Thomas. *LDP Specification*. Internet Engineering Task Force, Jan. 2001.

[Ame88] American National Standards Institute. Z136.2. *Safe Use of Optical Fiber Communication Systems Utilizing Laser Diodes and LED Sources*, 1988.

[AP94] S. Aidarus and T. Plevyak, editors. *Telecommunications Network Management into the 21st Century*. IEEE Press, Los Alamitos, CA, 1994.

[AR01] D. Awduche and Y. Rekhter. Multiprotocol lambda switching: Combining MPLS traffic engineering control with optical crossconnects. *IEEE Communications Magazine*, 39(4):111–116, Mar. 2001.

[Bla95] U. Black. *Network Management Standards*. McGraw-Hill, New York, 1995.

[BZB+97] R. Bradon, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. *Resource Reservation Protocol—Version 1 Functional Specification*. Internet Engineering Task Force, Sept. 1997.

[CGS93] I. Cidon, I. S. Gopal, and A. Segall. Connection establishment in high-speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(4):469–482, Aug. 1993.

[Epw95] R. E. Epworth. Optical transmission system. U.S. Patent 5463487, 1995.

[FB06] A. Farrel and I. Bryskin. *GMPLS: Architecture and Applications*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 2006.

[GR00] J. Gruber and R. Ramaswami. Towards agile all-optical networks. *Lightwave*, Dec. 2000.

[HFKV96] F. Heismann, M. T. Fatehi, S. K. Korotky, and J. J. Veselka. Signal tracking and performance monitoring in multi-wavelength optical networks. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, pages 3.47–3.50, 1996.

[Hil93] G. R. Hill et al. A transport network layer based on optical network elements. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11:667–679, May–June 1993.

[HK97] Y. Hamazumi and M. Koga. Transmission capacity of optical path overhead transfer scheme using pilot tone for optical path networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 15(12):2197–2205, Dec. 1997.

[Int93] International Electrotechnical Commission. *60825-1: Safety of Laser Products—Part 1: Equipment Classification, Requirements and User's Guide*, 1993.

[Int00] International Electrotechnical Commission. *60825-2: Safety of Laser Products—Part 2: Safety of Optical Fiber Communication Systems*, 2000.

[Int04] Internet Engineering Task Force. *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*, Oct. 2004.

[ITU96] ITU-T SG15/WP 4. *Rec. G.681: Functional Characteristics of Interoffice and Long-Haul Line Systems Using Optical Amplifiers, Including Optical Multiplexing*, 1996.

[ITU99] ITU-T. *Rec. G.664: Optical Safety Procedures and Requirements for Optical Transport Systems*, 1999.

[ITU01] ITU-T. *Recommendation G.8080/Y.1304: Architecture for the automatic switched optical networks (ASON)*, 2001.

[Mae98] M. Maeda. Management and control of optical networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 16(6):1008–1023, Sept. 1998.

[McG99] A. McGuire. Management of optical transport networks. *IEE Electronics and Communication Engineering Journal*, 11(3):155–163, June 1999.

[MSC05] M. McFarland, S. Salam, and R. Checker. Ethernet oam: key enabler for carrier class metro ethernet services. *IEEE Communications Magazine*, 43(11):152–157, Nov. 2005.

[RS97] R. Ramaswami and A. Segall. Distributed network control for optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Dec. 1997.

[RSPJ08] J.-D. Ryoo, J. Song, J. Park, and B.-S. Joo. Oam and its performance monitoring mechanisms for carrier ethernet transport networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(3):97–103, Mar. 2008.

[Sub00] M. Subramanian. *Network Management: Principles and Practice*. Addison-Wesley, Reading, MA, 2000.

[Udu99] D. K. Udupa. *TMN Telecommunications Management Network*. McGraw-Hill, New York, 1999.

[US86] U. S. Food and Drug Administration, Department of Radiological Health. *Requirements of 21 CFR Chapter J for Class 1 Laser Products*, Jan. 1986.

[VSN+01] E. L. Varma, S. Sankaranarayanan, G. Newsome, Z.-W. Lin, and H. Epstein. Architecting the services optical network. *IEEE Communications Magazine*, 39(9):80–87, Sept. 2001.

[Wei98] Y. Wei et al. Connection management for multiwavelength optical networking. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 16(6):1097–1108, Sept. 1998.

[Wil00] B. J. Wilson et al. Multiwavelength optical networking management and control. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 18(12):2038–2057, 2000.

第6章 网络生存性

提供防御故障的弹性是许多高速网络的一个重要需求。由于这些网络承载了越来越多的数据，网络相关故障所造成的破坏作用越来越大。单个故障可能影响数以百万计的用户，并导致网络用户与运营商损失数百万美元的收益。

作为运营商及其租赁连接的客户之间的业务等级协议的一部分，运营商承诺提供某一连接的可用性。通常要求连接在时间上达到99.999%可用，该要求相当于一条连接出故障的时间每年少于5分钟。

一条连接在源节点与宿节点之间路由时经常要经过许多节点，沿其路径可能有许多网元会出故障。获得99.999%可用性的唯一可行的方法是使网络具有生存能力，即在出现故障情况下还能够继续提供业务。保护倒换是用于保证生存性的关键技术。这些保护技术涉及在网络中提供一些冗余容量，并利用这些冗余容量自动地在故障周围重选流量路由。相关的一个术语是恢复。当流量在数十至数百毫秒时间恢复时，一些人采用术语“保护”，而采用术语“恢复”是针对流量恢复时间较慢的方案。然而，在本章中对“保护”和“恢复”不加区分。

保护通常采用分布式方法来实现，不需要网络集中控制。这样，在出故障后对保证业务快速恢复是必要的。

将涉及网络链路、节点和单一信道（WDM 网络情形下）的故障。此外，内嵌在当前网元内的软件极其复杂，由于软件错误而引起的可靠性问题已经成为一个严重问题。通常，采用正确的软件设计来处理这一问题，但是在网络中该问题很难避免。

在大多数情况下，故障都是人为失误引起的，如挖掘时挖断了光纤或操作人员错误地抽拔连接器或错误地关断开关。链路故障大部分是由于光纤中断而引起的，这是最可能发生的故障事件。据估计，长途网络每年每1000英里光纤遭受3次光纤中断[Gro03]，对于一个拥有30 000英里光纤的大型网络，每年将会发生90次光纤中断。

第二种最有可能出现的故障事件是网络设备中的有源器件故障，如发射机、接收机或控制器。在一般情况下，网络设备设计有冗余控制器。此外，控制器的故障不会影响流量，而只影响网络管理可见性。

节点故障是另一种可能性。整个中心局可能因故障而瘫痪，通常是因为灾变性事件，如火灾、洪水或地震。这些事件是罕见的，但一旦出现将造成大规模破坏。例如，1999年加拿大贝尔的多伦多中心局的火灾和2005年由卡特里娜（Katrina）飓风造成的中心局闭塞、洪水与停电。节点故障的另一个原因是由软件故障所造成的交换机或路由器出现故障。

保护方案也可以广泛地用于网络的维护操作。例如，为了检修一条链路，通常在检修之前采用保护方案将链路上的流量切换到备用路由。当网络节点或链路升级时，也采用相同的技术。

大多数情况下，保护方案设计得只为保护单一的故障事件或维护作业。如果网络很大，则需要提供同时处理发生多个故障或维护作业的能力。处理这一问题的一种方法是划分网络为若干更小的子网，并将保护方案限制在子网内运行，使得在任何给定时间每个子网只有一

个故障。处理该问题的另一种方法是确保修复一个故障的平均时间远小于故障间隔的平均时间。这样，可以保证在大多数情况下在下一个故障发生之前当前出故障的链路已经修复。然而，将要研究的一些保护方案可以保护网络同时出现某些类型的多发性故障。

恢复所需的时间依赖于所承载的数据应用/类型。对 SONET/SDH 网络，最大允许恢复时间为 60 ms(请注意，SONET/SDH 保护倒换时间为 50 ms，但不包含分配给检测或发现故障的另外 10 ms)。此恢复时间要求依据这样一个事实，即如果连接中断明显超过 60 ms，则一些网络设备就会中断通话。随着时间的推移，运营商已经习惯了在该时刻内得到恢复。但是，在数字而不是语音业务占统治地位的这一领域，60 ms 的数字不是一个严格的要求。运营商可能乐于接受更长一些的恢复时间，尤其是当他们看到这样做的其他好处，如较高的带宽效率，这反过来又会导致降低运营成本。另一方面，随着网络数据速率的增加，恢复时间的要求更加苛刻。在 10 Gb/s 速率下 1 s 的停机故障时间对应于丢失超过 1 G 字节的数据。当前，大多数 IP 网络基于尽力而为的准则提供业务，而不保证可用性，即尽其所能地在网络中选择最好流量路由，但是数据包通过网络时可能产生任意长的时延，并在发生阻塞的情况下可以被丢弃。

可以在网络中的多层内处理生存性。保护可以在物理层(即第 1 层)实现，该层包括 SONET/SDH、OTN 和光层。保护也可以在链路层(即第 2 层)实现，该层包括 MPLS、以太网和弹性分组环。最后，保护还可以在网络层(即第 3 层)实现，如 IP 层。有一些理由可以解释其原因，例如，每一层可以保护某些类型的故障，但是不能有效地保护所有类型的故障。本章中主要关注第 1 层恢复，但是也将简单地讨论适用于第 2 层和第 3 层的保护技术。

本章的其余部分安排如下：首先，概述保护方案的基本概念，当前电信网络所采用的许多保护技术是为了 SONET 和 SDH 网络应用而开发的，这些技术将详细探讨。我们还将研究当前的一些客户层协议是如何实现的，特别是以太网、IP、MPLS 和弹性分组环的协议。然后，将详细研究光层保护功能，最后讨论网络不同层的保护功能是如何可以一起工作的。

6.1 基本概念

种类繁多的保护方案用于当前的网络，工作路径与保护路径的概念对理解保护方案很重要。在正常状态下，工作路径承载业务，在故障发生情况下，保护路径提供承载业务的备用通道。工作与保护通道通常选择不同的路由，使故障发生时两条路径不会同时不工作。

保护方案设计得在网络拓扑范围内运行。一些工作针对点对点链路。环型拓扑特别流行于 SONET/SDH 网。环网是能在故障周围提供备用路由的最简单拓扑。光层中，许多保护方案是设计在真正的网状网拓扑上运行的。

该保护方案旨在可能的物理故障情形下取得成功。通常，假定大部分最有可能的故障是单一故障，而不是两个故障。多个故障也会予以考虑，但如果设计得当，可能出现多个故障的概率非常小。一个物理故障会导致客户层中一条或多条链路不能工作。单一器件故障(如波长转发器损坏)可能导致单条链路不能工作。如果光纤承载多个波长，则光纤中断会导致客户层多条链路不工作。单个故障所造成的多条链路同时出故障称为共享风险链路组(SRLG)。单一交换机或路由器故障也会导致 SRLG，因为连接到交换机或路由器的所有链路都将不工作。

保护可以是专用的，也可以是共享的。对于专用保护，为网络中的每个工作连接指配了专用带宽，在故障发生情况下，在该带宽上可以重选路由。对于共享保护，利用这样一个事

实，即网络中所有工作连接不会同时出现故障(例如，如果它们属于网络的不同部分)。因此，通过周密设计可使多条工作连接共享其保护带宽。这样有助于减少网络所需的保护带宽数量。共享保护的另一个优点是，在正常状态下保护带宽可以用于承载低优先级业务。在出现故障情况下，为使带宽用于保护连接，可以丢弃这些低优先级业务。

保护方案可以是可恢复的，也可以是不可恢复的。在这两种方案中，如果发生故障，流量从工作路径切换到保护路径。对于不可恢复方案，流量保持在保护路径上，直到通过人工切换回到初始工作路径。通常，由用户通过网络管理系统来实现。对于可恢复方案，一旦工作路径修复，流量将自动地从保护路径切换回工作路径。可恢复性使网络在故障恢复后重新回到其初始状态。专用保护方案可以是可恢复的，也可以是不可恢复的，但是共享保护方案通常是可恢复的。因为多个工作连接共享一个共用保护带宽，保护带宽在初始故障修复后必须尽快释放，使另一个故障出现时可以用于保护其他连接。

保护倒换可以是单向的，也可以是双向的。不要将其与光纤单向传输或双向传输相混淆。图 6.1 说明了两对光纤用于点对点链路的两种方案，其中每一芯光纤承载一个方向的流量(单向传输)。对于单向保护倒换，每个方向业务的处理与另一个方向无关，因此在单芯光纤发生中断时只有一个方向的流量切换到保护光纤上，而另一个方向的流量保持在初始工作光纤上。对于双向保护倒换，两个方向都切换到保护光纤。对于采用双向传输的情形，通常默认保护倒换是双向的，因为当一芯光纤中断时，两个方向的流量会丢失(如果是一个设备发生故障而不是一芯光纤中断，则可能两个方向上的流量不会都丢失)。

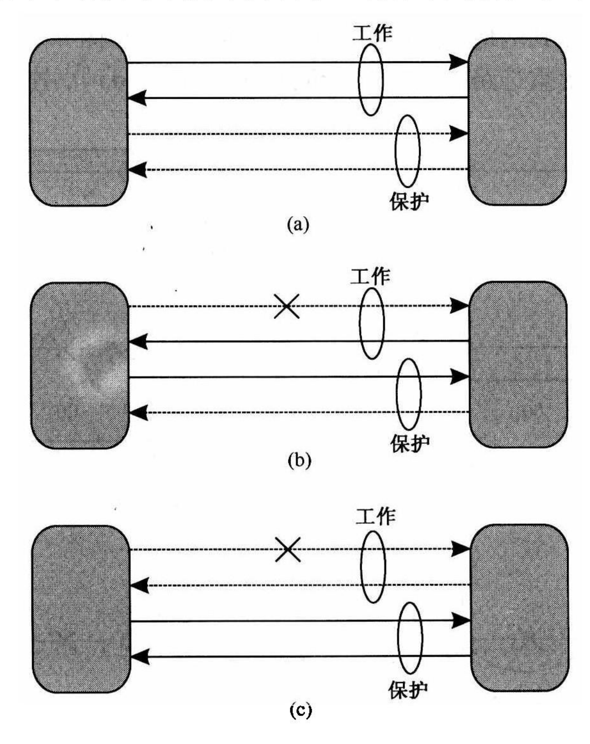


图 6.1　单向与双向保护倒换。(a)描述正常状态下的链路；(b)单向保护倒换：在一芯单向光纤中断后，只有受影响流量的方向切换到保护光纤；(c)双向保护倒换：在一芯单向光纤中断后，双方向的流量都切换到保护光纤

单向保护倒换与专用保护方案一起结合使用，因为它可以非常容易地在接收端实现将流量从工作路径转换到保护路径，而在接收机与发射机之间并不需要信令协议。例如，在图6.1中，如果从左到右承载流量的一芯光纤中断，不会影响从右到左承载流量的光纤工作，左端发射机不知道存在有故障。在单向专用保护情况下，如果流量同时在工作路径和保护路径上传输，则该路径的末端接收机简单地选择两个到达信号中更好的一路信号。但是，如果采用双向保护倒换，则接收机需要通知发射机已有一芯光纤中断。这就需要一种信令协议，称为自动保护倒换协议(APS)。

一个简单的APS协议按照如下方式运行：如果某节点的接收机检测到某芯光纤中断，则关断其工作光纤上的发射机，然后切换到保护光纤来传输流量。另一个节点上的接收机也检测到工作光纤的信号丢失，并将其流量切换到保护光纤。SONET和光网络所采用的实际APS协议更加复杂，因为与上述简单的APS协议相比较，实际APS协议必须对可能出现的各种场合进行处理。

在双向通信系统中，如果其业务在一芯光纤中双向传输，源和宿将同时检测光纤中断。尽管不需要APS协议来处理光纤中断，但是仍然需要APS协议来处理单向设备故障并支持其他维护功能。

在共享保护方案情况下，需要APS协议来协调使用共享保护带宽。因此，大部分共享保护方案采用双向保护倒换，因为与单向保护倒换相比，它更容易控制与管理更复杂的网络。

还有一个问题是，当一个故障发生时，流量会怎样并在哪里重选路由。这里，将区别路径倒换、跨距倒换和环倒换。图6.2说明了这些概念。对于路径倒换[见图6.2(b)]，连接沿备用路径从其源到宿端到端地重选路由。对于跨距倒换[见图6.2(c)]，连接在紧邻故障的节点之间的共享链路上重选路由。对于环倒换[见图6.2(d)]，连接在紧邻故障的节点之间的环上重选路由。

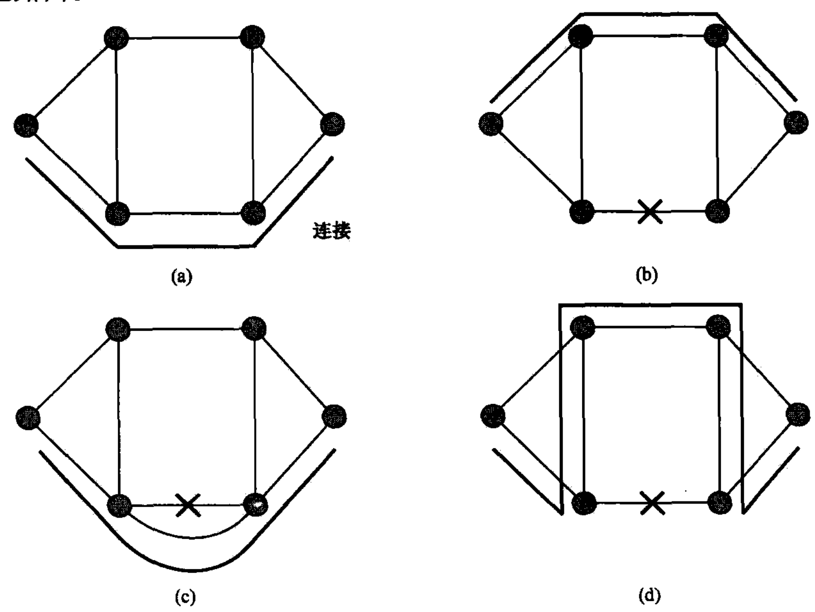


图6.2 路径倒换、跨距倒换和环倒换。(a)正常状态下连接的工作路径；(b)路径倒换：连接在备用路径上端到端地重选路由；(c)跨距倒换：连接在紧邻故障的节点之间的共享链路上重选路由；(d)环倒换：连接在紧邻故障的节点之间的环上重选路由

最后，不同的保护方案运行在网络的不同层(例如，SONET/SDH、MPLS、IP 和以太网)和层内的不同子层上。例如，一些方案每次保护一条连接，而其他方案同时保护在一芯故障光纤上的所有连接。在 SONET/SDH 网络中，前一种方案运行在路径层，而后一种方案运行在线路(SDH 的复用段)层。许多情况下，路径层端到端地运行，沿备用路径从源到宿全程重选流量路由；相比之下，线路层方案几乎都是局部的，即在故障链路周围重选流量路由。类似地，光层中保护方案可以运行在光信道层，也可以运行在光复用段层。

6.2 SONET/SDH 保护

SONET 和 SDH 网络建设的主要成就之一是整个网络的可用性和可靠性得到明显改善。这是通过使用大量的保护技术来实现的。类似的方案既用于 SONET，也用于 SDH，但是它们的专业术语不同。我们将规范这两种专业术语，但大部分情况下采用 SONET 的术语。

表 6.1 给出了不同保护方案的分类。首先，描述简单点对点链路所采用的不同类型保护机制，然后讨论其如何应用于网络。每一种保护方案可以与网络的特定层相关联。在第 3 章可以看到，SONET 层包括一个路径层和一个线路层。路径层与线路层的保护方案都得到了实际应用。类似地，SDH 网络既采用信道层保护方案，也采用复用段(MS)层保护方案。路径层保护方案运行在网络单一路径或连接上。例如，在支撑 STS-1(51 Mb/s)连接的 OC-48(2.5 Gb/s)环上，通道层方案独立地处理每个 STS-1 连接，并相互独立地实施保护倒换。另一方面，线路层方案同时运行在所有连接上，通常不区分不同的连接，这些连接中都是汇聚的信号。在前一个例子中，OC-48 环的线路层保护方案同时切换 OC-48 内的所有连接(这句话也有一些例外。以后将讨论的双向线路倒换环。(BLSR)允许每个连接设置比特。当故障发生时只切换所规定的连接。这需要确保，如果需要的话，则一些连接可以无保护，节点故障的处理也是一样。这些内容将在 6.2.4 节中看到。)

表 6.1　SONET 和 SDH 的保护方案汇总。其中 N 表示共享单一保护接口的工作接口数量。保护方案既运行在路径层，也运行在 SONET 线路层/SDH 复用段(MS)层。路径层环方案包括单向路径倒换环(UPSR)或 1+1 子网连接保护(SNCP)。线路层环方案包括双向线路倒换环(BLSR)或等价的复用段共享保护环(MS-SPRing)

	保护方案				
SONET 术语	1+1	1:N	UPSR		BLSR
SDH 术语	1+1	1:N		SNCP	MS-SPRing
类型	专用	共享	专用	专用	共享
拓扑	点到点	点到点	环	环/网状	环
层	线路/MS	线路/MS	路径/-	-/路径	线路/MS

6.2.1 点对点链路

保护机制的两种基本类型用于点对点链路:1+1 保护和 1:1 保护，或更普遍的 1:N 保护，如图 6.3 所示。这两种保护方案都运行在线路层或复用段层。

对于 1+1 保护，流量在从源到宿的两芯独立的光纤中同时传输(通常，在不交叉的路由上)。假设是单向保护倒换，宿简单地选择两芯光纤中其中一芯光纤作为接收。如果该芯光纤中断，宿简单地切换到另一芯光纤，并继续接收数据。该保护方式非常快速，且两端之间不需要信令协议。请注意，因为连接通常是全双工的，实际上在两个节点(比如，节点 A 和节点 B)之间有一对光纤用于工作流量。一芯光纤承载从 A 到 B 的流量，而另一芯光纤承载从 B 到 A 的流量。同样，还有另一对光纤用于保护流量，节点 A 的接收机和节点 B 的接收机可以独立地做出保护倒换的决定。

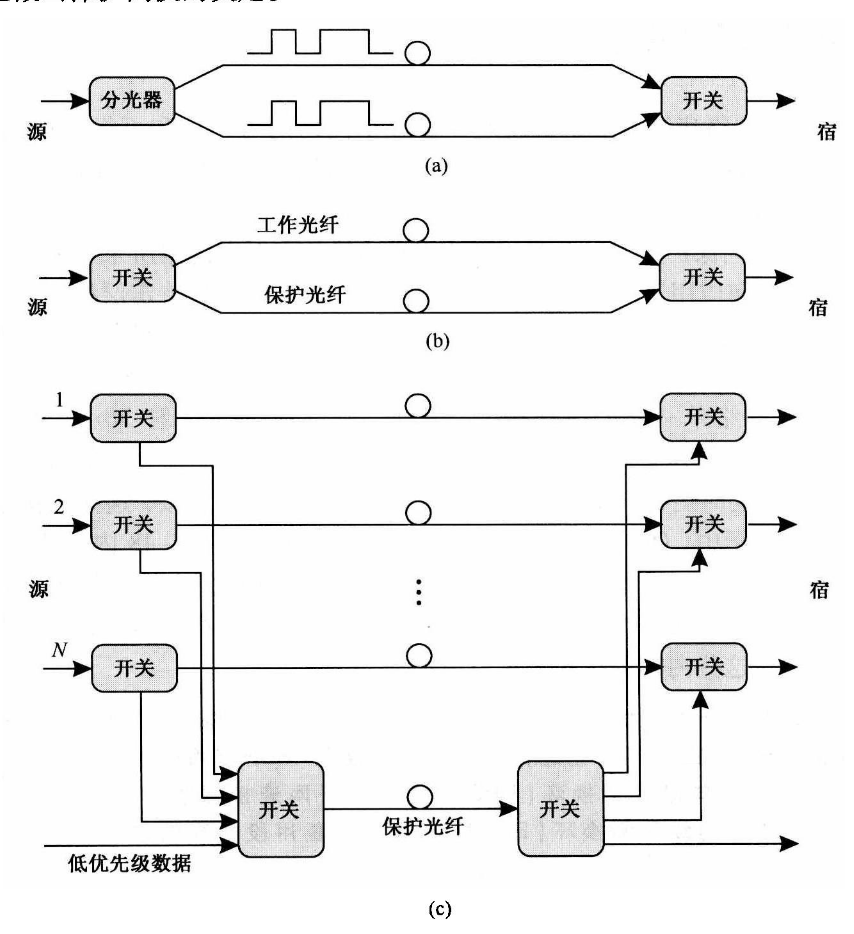


图 6.3　点到点链路的不同类型保护技术。(a)1+1 保护:信号同时在两个路径上传输；(b)1:1保护:在正常状态下,信号在工作路径上传输,但故障后切换到保护路径；(c) 1:N保护:这是更普遍的1:1保护方式,N个工作路径共享单一保护路径

在 1:1 保护中，从源到宿仍然有两芯光纤。但是，流量每次只在一芯光纤(即工作光纤)中传输。如果该芯光纤中断，则源和宿都同时切换到另一芯保护光纤上。如前所述，在源与宿之间需要 APS 协议作为信令。为此，1:1 保护在恢复流量上不如单向 1+1 保护快，因为要增加通信开销。但是，与 1+1 保护方案相比，1:1 保护有两个主要优点。第一个优点是，在正常状态下保护光纤并未使用，因此可以用于传输低优先级业务。如果工作光纤中断，该低优先级业务必须丢弃。该领域的 SONET 和 SDH 设备不支持这种低优先级业务或附加业务。

该功能当前没有广泛的应用，但是在过去运营商在其网络暂时超容量时有时采用这一功能来承载低优先级数据业务，甚至承载语音业务。随着数据业务的涌现，将来这种情况可能会发生变化，参见6.4节。特别是尽力而为的数据业务可能使用该种方法。

另一个优点是，1:1保护可以扩展到许多工作光纤共享单芯保护光纤。对于更普遍的1:N保护方案，N芯工作光纤共享单芯保护光纤。该解决方法可以处理任何单芯工作光纤的故障。要注意，当多个故障发生时，APS协议必须保证故障光纤中只有一芯故障光纤的流量切换到保护光纤中。

在先前的讨论，谈到了如何实现保护，但是仅涉及发起保护倒换的触发机制。在SONET/SDH中连续监控输入信号。如果信号故障或检测到线路信号劣化状态，则发起保护倒换。信号故障属于硬故障，通常检测为信号丢失或SONET/SDH帧丢失。由于恢复时间只允许在60 ms内，因此必须在10 ms内完成检测故障和发起保护倒换。

6.2.2 自愈环

环网在运营界及企业网中已经非常普遍。环是最简单的2连接拓扑，即在任何一对节点之间提供两条独立的路径，除了源节点和宿节点外，通常没有任何节点或链路。这样，可使环网对故障具有弹性。从光纤布局观点看，环是高效的，即多个站点可以采用单一物理环互连。相反之下，中心局站方法需要在每个站点与中心局节点之间敷设光纤，并要求每个站点与中心局之间的两条路由不会相交。这是一种成本更高的方案。

当前很多运营商的基础设施采用SONET/SDH环。这些环称为自愈环，因为该环纳入了保护机制。该保护机制自动地检测故障并在远离故障链路与节点处重选路由，并快速地将流量转到其他路由上。自愈环采用SONET/SDH分插复用器(ADM)来实现，如3.1节中所述。这些ADM在环中有选择性地上下路流量，并保护流量不受故障的影响。

不同类型的环结构在流量的方向性上和所用的保护机制上有所区别。单向环只在环的一个方向(比如，顺时针方向)承载工作流量，如图6.4所示。从节点A到节点B的工作流量沿环顺时针方向传送，而从节点B到节点A的工作流量也是在环中不同的链路顺时针传送。双向环在两个方向都承载工作流量。图6.5描述了一个四纤双向环，从节点A到节点B的工作流量沿顺时针传送，而从节点B到节点A的工作流量沿环逆时针传送。要注意，在单向和双向SONET/SDH环中，所有连接都是双向的，并在两个方向上使用相同的带宽。两个方向的连接根据环的类型不同选择路由，如前所述。

SONET/SDH标准要求在SONET/SDH环中出故障后业务必须在60 ms内恢复。该时间包括几个部分:检测故障所需的时间分配10 ms；在网络中向其他节点发送信令所需的时间(如果需要的话)，包括传播时延、实际切换时间和在切换发生后重新获得帧同步所需的时间。

双纤单向路径倒换环(UPSR)、四纤双向线路倒换环(BLSR/4)和双纤双向线路倒换环(BLSR/2)这三种环结构已经被广泛地应用。对于SDH，已经规定1+1路径保护运行在更普遍的网状拓扑上，称为子网连接保护(SNCP)。SDH复用段共享MS-SPRing/4(保护环/4)和MS-SPRing/2，它们分别类似于BLSR/4和BLSR/2。表6.2中总结了不同结构的功能，将在下一节进行详细讨论。

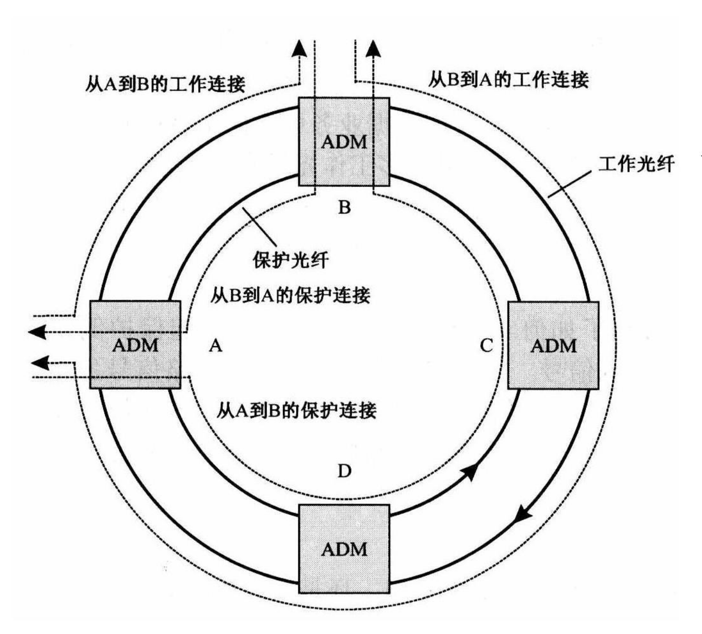


图 6.4 单向路径倒换环(UPSR)。其中,一芯光纤作为工作光纤,而另一芯光纤作为保护光纤。流量在工作光纤和保护光纤上分别按顺时针方向和逆时针方向同时传输。保护在路径层进行

表 6.2 不同类型自愈环的比较

参数	UPSR SNCP	BLSR/4 MS-SPRing/4	BLSR/2 MS-SPRing/2
光纤对	1	2	1
TX/RX 对/节点	2	4	2
保护类型	专用	共享	共享
保护容量	= 工作容量	= 工作容量	= 工作容量
链路故障	路径倒换	跨距/环倒换	环倒换
节点故障	路径倒换	环倒换	环倒换
恢复速度	较快	较慢	较慢
实现	简单	复杂	复杂

6.2.3 单向路径倒换环

图 6.4 描述了一个单向路径倒换环(UPSR)。一芯光纤作为工作光纤,而另一芯光纤作为保护光纤。从节点 A 到节点 B 的流量在工作光纤和保护光纤上分别按顺时针方向与逆时针方向同时发送;每个连接的保护在通道层以如下方式实现。节点 B 连续监控工作光纤与保护光纤,并对每个 SONET 连接选择两路信号中较好的一路信号。在正常状态下,假设节点 B 从工作光纤接收流量。如果出现一个链路故障,比如,链路 AB,则节点 B 将切换到保护光纤,并继续接收数据。要注意,切换基于逐一连接原则来实现(见习题 6.8)。可以看到,除了运行在环的路径层而不是在点对点结构的线路层之外,它基本上与以前讨论的 1 + 1 保护方案一样。

请注意,这种保护方案很容易处理链路、发射机/接收机或节点的故障。其实现简单,节点间不需要协议或通信。其所保护的容量与工作容量相同。该方案对其他环结构也是如此。

UPSR 的主要缺点是,它并没有在空间上重复使用光纤容量。这是因为每条(双向)连接耗尽了环中每条链路的容量及相应的专用保护带宽,因此在连接之间没有了共享保护带宽。

例如，假设每个连接需要 51 Mb/s(STS-1)带宽且该环运行在 622 Mb/s(OC-12)，则该环可以支持共计 12 个 51 Mb/s 连接。下面将讨论的 BLSR 结构包含空间重用，并有可以支持比传输速率更高的总流量能力。

UPSR 是低速本地交换与接入网络的流行拓扑，特别是针对流量主要从接入节点集中到运营商中心局的枢纽节点。在这种情况下，将看到 UPSR 可以支持的流量承载容量与包含空间重用的更复杂的环结构所支持的容量相同。由于其简单性及其所带来的低成本，UPSR已经成为这类应用的一种有吸引力的方案。当前典型的环速率为 OC-3(STM-1)和 OC-12(STM-4)。UPSR 在其节点数和环长度上没有规定限制。实际上，由于承载信号在其顺时针和逆时针路径上的延迟时间有所不同，因此将限制环的长度，进而影响在故障发生时的恢复时间。

UPSR 本质上是在环的路径层实现的 1 +1 保护。

6.2.4 双向线路倒换环

双向线路倒换环(BLSR)比 UPSR 更加复杂，它包含如下所述的额外的保护机制。与 UPSR 不同，BLSR 运行在线路层或复用段层。在 SDH 领域的 BLSR 称为复用段共享保护环(MS-SPRing)。

图 6.5 描述了一个四纤 BLSR。其中两芯光纤作为工作光纤，还有两芯光纤用于保护。与 UPSR 不同，BLSR 的工作流量可以在环的两个方向上传送。例如，在工作光纤上，从节点 A 到节点 B 的流量沿环的顺时针方向传送，而从节点 B 到节点 A 的流量沿环的逆时针方向传送。属于连接的两个方向的流量通常在环中两个节点之间最短通道上选择路由。但是，在某些情况下[Kha97, LC97]，流量可能沿最长路径选择路由，以降低网络阻塞并更好地利用可用容量。

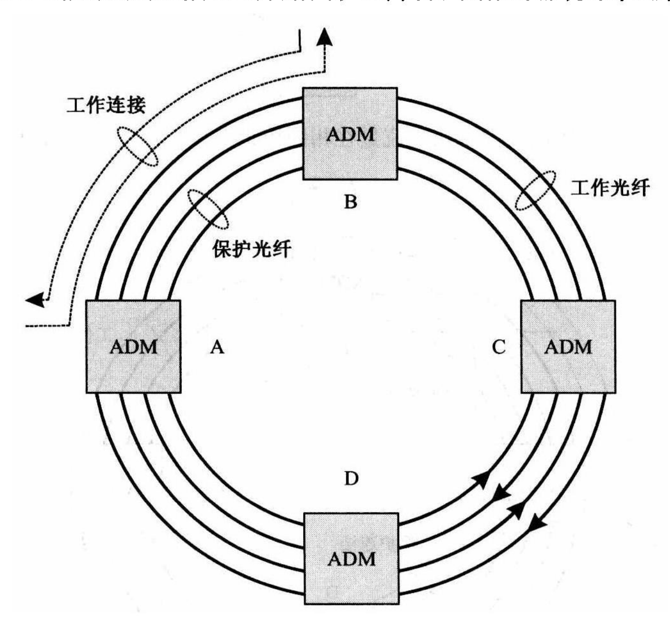


图 6.5　四纤双向线路倒换环(BLSR/4)。其中，该环有两芯工作光纤和两芯保护光纤。两个节点间的流量通常在其最短路径上传输，跨距倒换或环倒换在故障后用于恢复流量

一个 BLSR 最多可以支持 16 个节点，该节点数量由节点标志符的 4 比特寻址字段所限

制。由于在故障发生情况下对恢复时间的要求，最大环长度限制在 1200 km(6 ms 传输时延)。对于更长的环，特别是对于海底应用，已经放宽了 60 ms 恢复时间的限制。

BLSR/4 采用了跨距倒换和环倒换两种类型的保护机制。在跨距倒换中，如果工作光纤上的发射机或接收机出故障，流量路由到同一链路的两个节点之间的保护光纤上，如图 6.6 所示。(如果工作光纤能单独路由到该跨距所提供的保护光纤上，那么跨距倒换也可以用于工作光纤发生断裂故障后的流量恢复。但是，通常不是这种情况。)在光纤或光缆中断时，采用环倒换来恢复流量，如图 6.7 所示。假设链路 AB 出故障，则在故障链路上的流量由节点 A 和节点 B 沿着环在保护光纤上重选路由。环倒换也可以用于防止节点的故障。

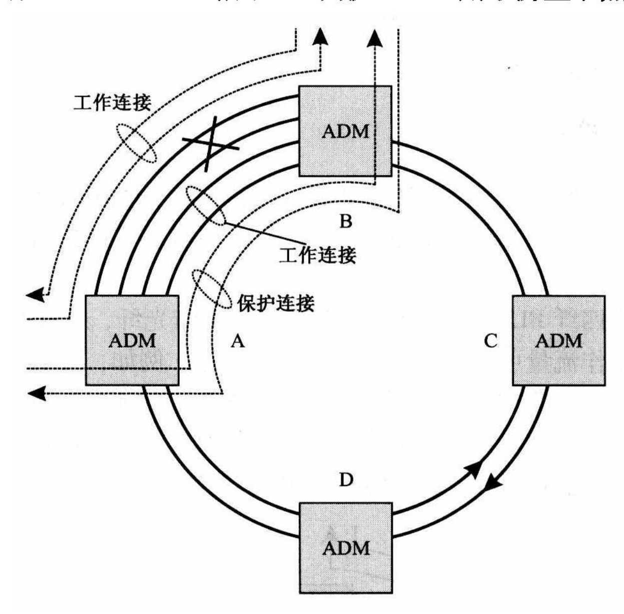


图 6.6　对 BLSR/4 跨距倒换的说明。流量在相同跨距上从工作光纤对切换到保护光纤对

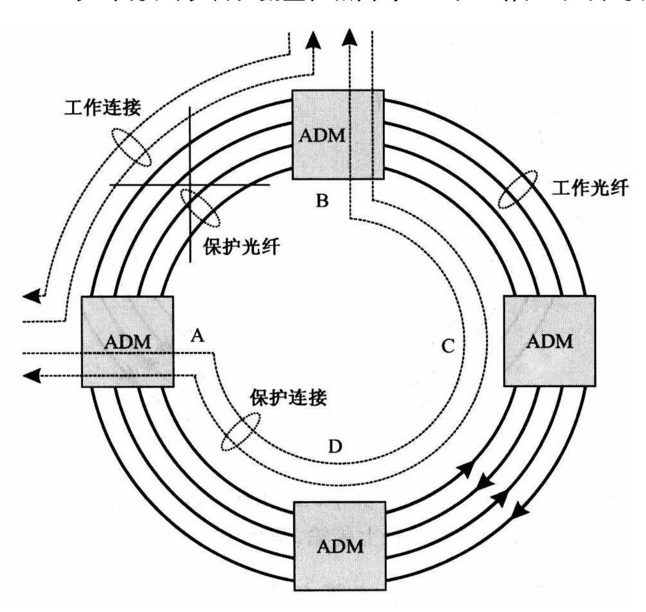


图 6.7　BLSR/4 中环倒换说明。流量在环中通过邻近故障的节点重选路由

如图 6.8 所示 BLSR/2 可以认为是一种保护光纤嵌入在工作光纤上的 BLSR/4。在 BLSR/2 中，两芯光纤用于传送工作流量，但是每芯光纤的一半容量预留作为保护之用。与 BLSR/4 不同，跨距倒换是不可能的，但是环倒换与 BLSR/4 大致一样。当链路故障发生时，故障链路的流量使用两芯光纤的可用保护容量沿环的其他部分重选路由。与点对点链路中的 1∶1 保护一样，BLSR 的一个优点是在正常运行情况下保护带宽可以用于承载低优先级流量。如果该带宽需要用于流量恢复，则恢复流量优先占用。

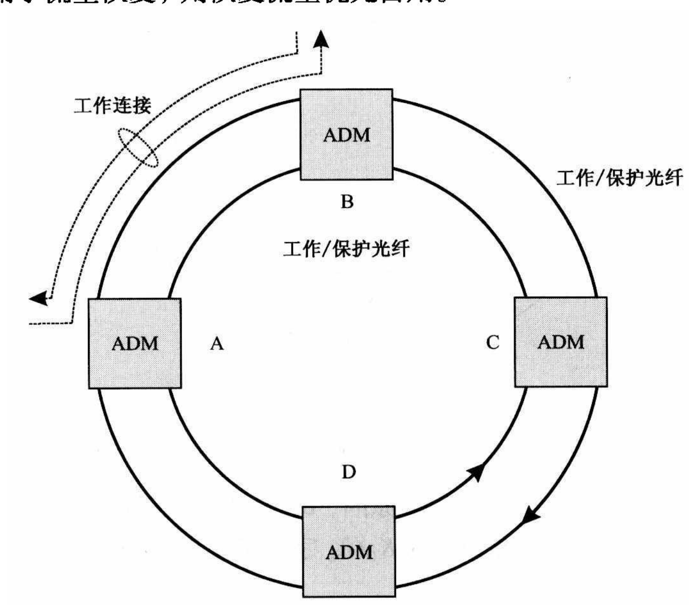


图 6.8 双纤双向线路倒换环(BLSR/2)。其中，该环有两芯光纤和一半带宽，环倒换用于故障后的恢复业务

BLSR 通过在空间上分离的连接之间共享保护带宽来提供空间重用能力。图 6.9 说明在最佳情况下实现的空间重用。如同上述的 UPSR 例子，考虑运行在 622 Mb/s(OC-12)，支持 51 Mb/s STS-1 连接的 BLSR/2。该图显示了 4 个节点和每对相邻节点之间有 STS-1 连接的环网。注意，所有 4 个连接可以通过环中所有连接共享的 51 Mb/s 专用带宽来保护。这是因为这些连接没有空间交叠，因此如果仅处理单一故障，则不需要同时恢复。在该例中，与仅支持 12 个 51 Mb/s 连接相等同的 UPSR 比较，622 Mb/s 环可以支持总计 24 个51 Mb/s 连接(每链路 6 个连接，要注意在 4 条链路上只有一半的工作流量容量可用)。该容量随环网中节点数的增加而增加。在上例中一个 8 节点 OC-12 BLSR/2 可以支持 48 个 STS-1 连接。

因此，BLSR 在分布式流量模式的保护下比 UPSR 效率更高。正如上面所看到的，其效果来自于这样一个事实，即环中的保护容量是在所有连接之间共享的。因此，BLSR 广泛地配置在长途和局间网络中，其流量模式比接入网更具分布性。目前，这些环网运行在 OC-12(STM-4)、OC-48(STM-16)和 OC-192(STM-64)速率。大部分城域运营商已经配置了 BLSR/2，而许多长途运营商已经配置了 BLSR/4。BLSR/4 比 BLSR/2 能够处理更多的故障。例如，一个 BLSR/4 可以同时处理环网中每个跨距的一个发射机故障。BLSR/4 还比 BLSR/2 环更容易维护，因为无须拆卸环就可以独立地维护多个跨距。但是，BLSR/4 的环网管理比 BLSR/2 更复杂，因为必须协调多种保护机制。

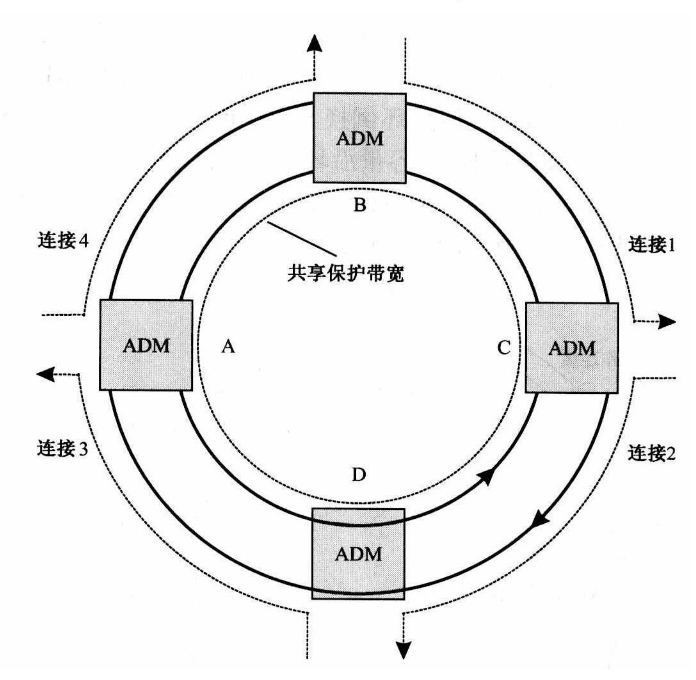


图6.9 BLSR的空间重用。只要任何链路没有交叠，多条工作连接就可以共享环中保护带宽

实现BLSR比UPSR更复杂。基于很多原因，BLSR需要大量的节点间信令，这点在下面将会进行讨论。信令采用SONET开销中的K_1/K_2字节来实现(见第3章)。

BLSR节点故障的处理

迄今为止，主要涉及了如何处理链路故障，如由光纤中断造成的故障。节点故障通常是不太可能的，因为许多情况下采用了冗余配置(如双重供电和交换结构)。但是，由于某些灾难性事件或人为失误，节点仍然可能出故障。处理节点故障使BLSR恢复机制复杂化。相邻节点把节点故障看做它们连接到故障节点的链路故障。但如果每个相邻节点都假定这是单一链路故障来实施恢复，则可能产生不良后果。一个例子如图6.10所示。在该例中，当节点1出故障时，节点6和节点2会假定其是链路故障，并试图沿环重选路由(环倒换)来恢复流量，这样就会造成如图所示的错误连接。避免这种错误的唯一方法是确保实施恢复的节点在激活恢复机制之前就确定故障的类型。这将需要在网络节点之间交换信息。在上例中，节点6和节点2首先设法在环中交换信息，以确定是否都有链路故障记录，如果有，则激活相应的恢复程序。如果不去试图恢复来自或终接于故障节点的任何流量，则该恢复过程可以避免产生这些错误连接。这种方法称为抑制。因此BLSR中每个节点维护一些抑制表，该抑制表用于表明在节点发生故障时哪些连接需要被抑制。这样做要付出的代价是恢复时间较慢，因为节点间需要协调，以确定激活相应的恢复机制。

BLSR中的低优先级流量

正如先前看到的1:1保护那样，BLSR可以在正常状态下利用保护带宽来承载低优先级流量或额外的流量。这些额外的流量在故障发生情况下会被丢弃。但是，当故障发生时，该功能在节点间需要额外信令来告知其他节点应该运行在保护模式并丢弃低优先级流量。

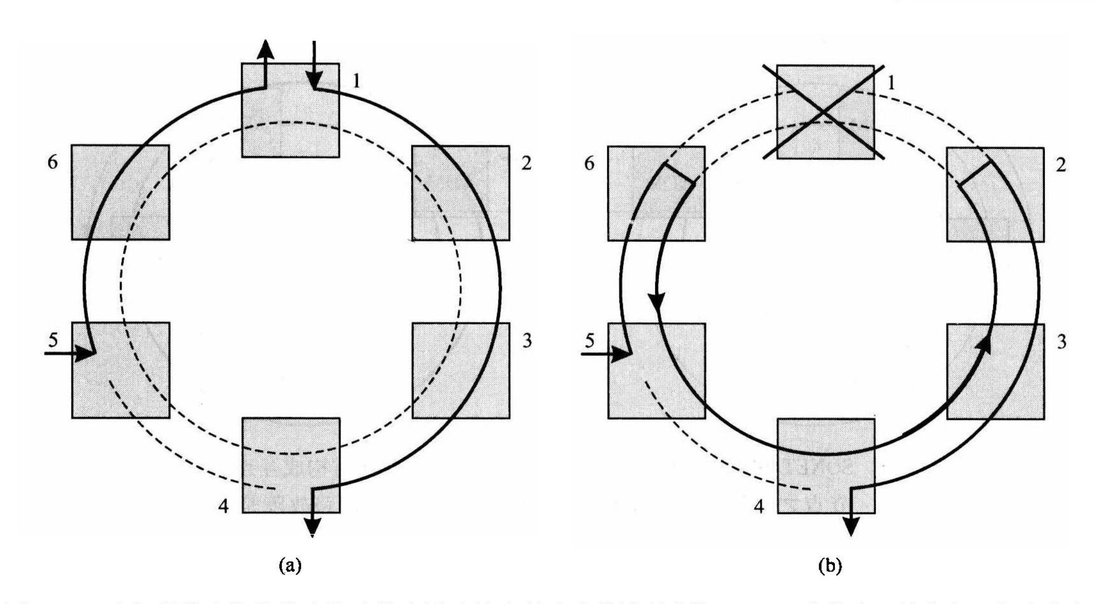


图 6.10　由相邻节点将某节点故障作为链路故障所造成的错误连接。(a)正常状态，其中有一条从节点5到节点1的连接和另一条从节点1到节点4的连接；(b)节点1出故障后，节点6和节点2各自激活环倒换。这样导致在节点5与节点4之间错误地建立了一条连接。该问题通过下述方法可以避免：首先确定哪个节点是故障节点，然后不恢复任何来自或终接于该故障节点的任何连接

6.2.5　环互连与双归属

一个单一环网仅仅是整个网络的一部分。整个网络通常由相互连接的多个环网构成，并且一条连接必须路由通过多个环网才能到达其终点。因此，这些环网的互连是需要考虑的一个重要问题。环网互操作的最简单方法是，背靠背地连接不同环网的两个 ADM 的下路端，如图 6.11 所示。互连通常采用比线路比特率更低的信号来实现。例如，两个 OC-12 UPSR 可以采用 DS3 信号来互连。在许多情况下，数字交叉互连散置在两个环之间，以提供额外的梳理与复用能力。

该方法的问题是，如果其中一个 ADM 出故障或两个 ADM 之间的线缆有问题，则互连会中断。处理该问题的一种方法是采用双归属方法。双归属方法采用两个枢纽节点来实现互连，如图 6.12 所示。对于环间传送的流量，在一个环网中的源节点与两个枢纽节点间都建立连接。因此，如果其中一个枢纽节点出故障，另一个枢纽节点可以替代，并且最终用户察觉不到流量会有任何中断。类似地，如果两个枢纽节点之间的一条缆线中断，则可采用备用保护路径来恢复流量。

与其在源节点与两个枢纽节点之间建立两个独立地连接，还不如采用由 ADM 内含的多播，或下路并续传功能所构成的一种结构。考虑如图 6.12 所示的一个端节点与两个枢纽节点(枢纽节点 1 和枢纽节点 2)之间的连接。在环的顺时针方向，与该连接相关的流量在枢纽节点 1 的 ADM 下路，同时该流量也可以沿环续传并在枢纽节点 2 再下路；同样地，在沿环的逆时针方向上，枢纽节点 2 的 ADM 利用其下路并续传功能将该连接的流量下路，以及可将流量直通到枢纽节点 1。注意，为了实现该种功能，将需要耗尽每个环上的两个枢纽节点之间的额外带宽。

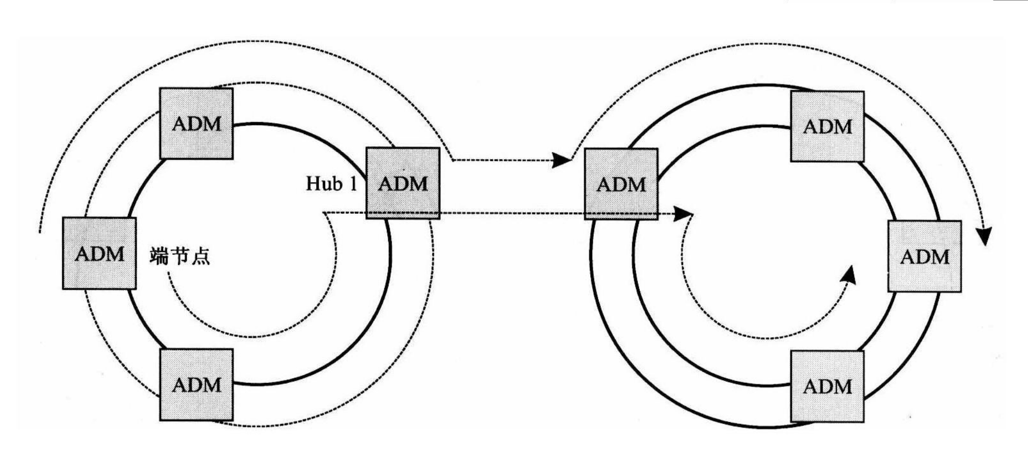


图 6.11 SONET/SDH 环的背靠背互连。这种简单的互连对构成互连的两个节点之中任一节点故障,或这两个节点之间的链路故障是脆弱的

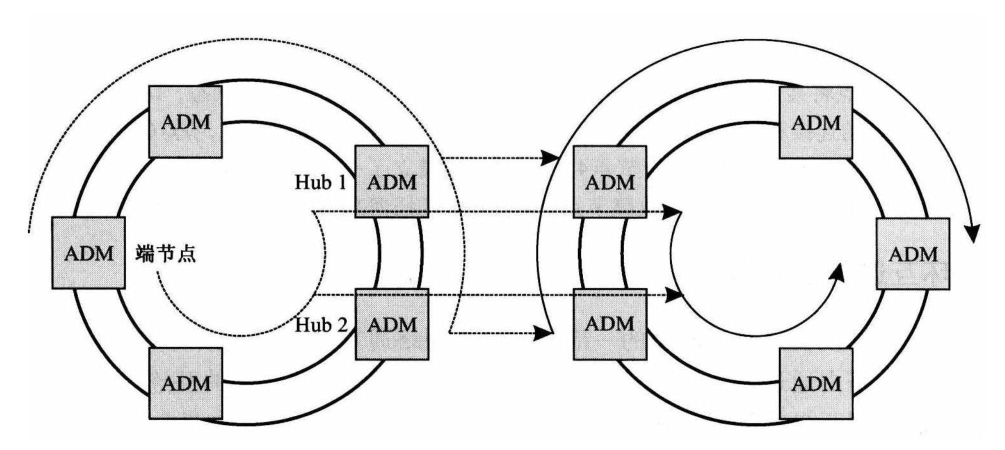


图 6.12 处理枢纽节点故障的双归属方法。每个端节点连接到两个枢纽节点,使之能够恢复任一个枢纽节点的故障或枢纽节点之间的任何互连故障。所有节点中的ADM具有“下路并续传”功能。该功能可以使其中流量下路,也可以直通续传到下一个ADM

商用接入网正在采用双归属方法,以实现 UPSR 与局间 BLSR 的互连接入,以及实现多个 BLSR 的互连。双归属还可以应用于两个子网之间的互连,而不一定是两个环网(尽管环网是主要的应用)。一般来说,为了使双归属工作正常,双节点本身的互连必须是一个受保护的子网,以至于当任一个枢纽节点或互连它们的链路出故障时备用路径是可用的。

6.3 客户层保护

下面将描述其他客户层网络的生存性机制,特别是对 IP、MPLS、以太网和弹性分组环(RPR)网络。MPLS、以太网和 RPR 协议具有 60 ms 的电信级保护倒换时间,以恢复故障连接。MPLS 具有保护连接段的一种快速重路由机制。MPLS 和以太网具有为路径连接的路径倒换[见图 6.2(b)],这通常称为线性保护。

RPR 为环形拓扑而设计,通过环倒换来保护[见图 6.2(d)]。以太网和 MPLS 运行在环

形拓扑时也有保护倒换方案。在SONET/SDH BLSR、RPR和MPLS环网中，工作流量可以在环的任一边选择路由，因此可以选择最短通道。这有助于减小链路上的流量负载。另一方面，以太环网通过停用环网上的一条链路以生成树的方式运行。这样，分组数据包只在环的一侧选择路由，从而使链路上的包路径更长，流量负载更高。

6.3.1 弹性分组环保护

弹性分组环(RPR)具有两种生存性机制，如图6.13所示。在图6.13(a)中，节点A有一个新数据包要传输到节点B。正常情况下，节点A将该包插入到子环0。但是，由于在节点X和Y之间已经出现一个故障，节点A把该包插入到子环1。该机制称为源路由方式，它是强制性的。所有节点都知道何时实施源路由方式，因为它通过交换控制信息中的拓扑信息来维护当前拓扑信息。拓扑信息定期地交换，当有如链路故障等拓扑变化时也交换。

由于传送控制信息的时延，因此在节点激活源路由之前可能有明显的时延。同时，可能丢失很多数据包。另一种有更快保护倒换时间的保护机制如图6.13(b)所示。现在，子环0发往宿节点B的一个数据包遇到节点X和节点Y之间的一个链路故障。它切换到另一个子环1并继续传送直到到达故障链路的另一端。然后，再切换回其原来的子环0并继续传送。这种机制称为环回方式，它是选择性的。注意，当数据包在子环1传送时，在其宿节点B是续传而不是下路，只有在子环0传送时才会在宿节点B下路。这有助于故障产生后避免数据包失序。环回方式可实现更快的保护倒换，因为它只使用了相邻链路的信息来确定何时发起保护倒换。另一方面，它比源路由方式占用了更多的带宽。请注意，环回方式重选路由流量类似于SONET/SDH BLSR网络在出现故障时重选路由流量的方式。

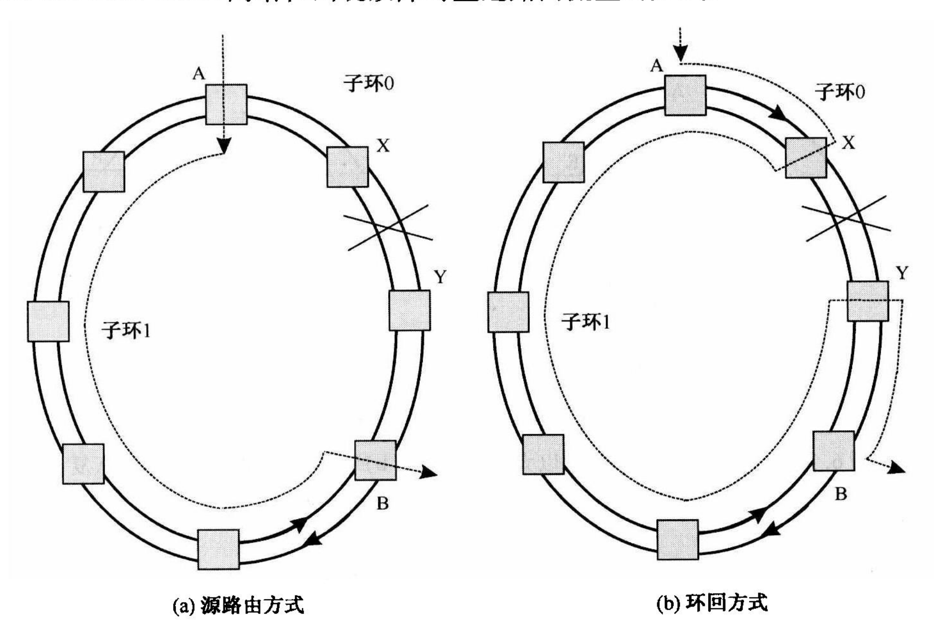


图6.13　弹性分组环保护。(a)源路由方式；(b)环回方式

有两种数据包处理模式：严格模式和松弛模式。在严格模式中，数据包必须按照次序传送，且不能使用环回方式。在这种模式下，当检测到一个故障时，所有节点停止上路数

据包，并丢弃中转数据包。所有节点一直等待到其拓扑镜像稳定(即不再改变)。然后重新开始上路与转发数据包，将数据包发送到任何合适的地方。严格模式是默认模式。在松弛模式中，数据包可以不按次序地发送。如果同时使用环回方式和源路由方式，则采用松弛模式。保护的次序是首先使用环回方式以使丢包最少，然后再采用源路由方式以有效地利用带宽。

6.3.2 以太网保护

在交换式以太网络中，生成树协议(STP)有一种内置的保护机制。初始 STP 阻塞了链路，以至于其余的有效链路形成一个生成树，就如 3.4.2 节所述的那样。如果一个树链路出故障，则 STP 将配置另一个生成树。然而，重新配置可能需要花费数十秒。

快速生成树协议(RSTP)包含许多基本型 STP 的增强功能，其中改进之一如图 6.14(a)所示。图中描述了初始 STP 的一种生成树，只有一个根交换机。每个非根交换机有一个根端口，它以最短路径通向根交换机。对应的链路是该树的一部分，该链路另一端的端口称为指定端口。所有其他端口都被阻塞。在 RSTP 中，每个非根交换机可以指定其中一个阻塞端口作为其根端口的备用端口。当根端口出故障时，备用端口可以迅速地去除阻塞，成为新的根端口，如图 6.14(b)所示。注意，必须仔细地选择备用端口，使新配置仍然是一个生成树。这些增强功能也可以应用于 VLAN。

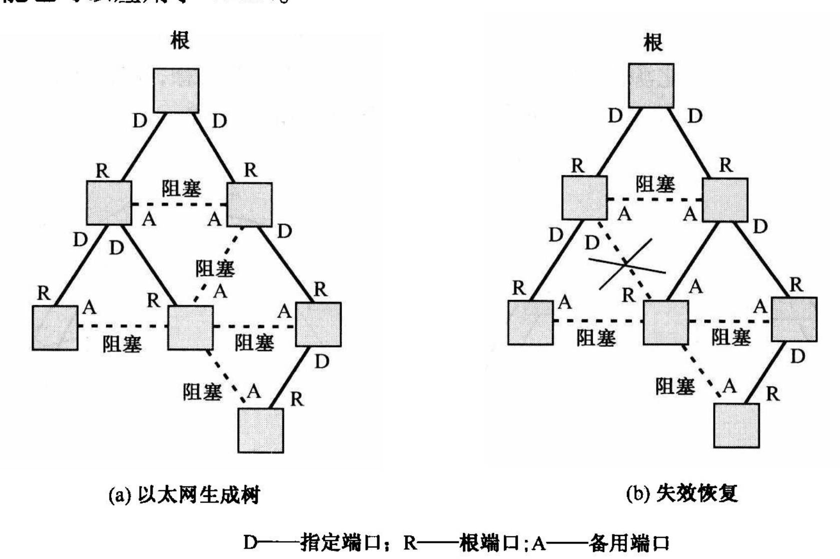


图 6.14 (a)具有备用端口的以太网生成树；(b)利用备用端口从故障中恢复

电信级传送

为了支持 60 ms 保护倒换时间的电信级业务，以太网有路径保护倒换(线性保护)和环形拓扑网络保护倒换。

ITU G.8031 标准具有单向连接和双向连接的路径保护倒换：1 +1 单向连接、1 +1 双向连接和 1:1 双向连接。工作与保护路径有 VLAN ID。在保护倒换期间，VLAN ID 对避免产生错误连接很重要。注意，一条双向连接通过相反方向的两条单向连接来实现，并具有同样的工作与保护路径。

对于1+1保护倒换，流量分别同时在工作与保护路径上传输，如果检测到信号故障，则接收机切换到保护路径。对1+1双向保护倒换还有另外的要求，即当工作路径有故障时两端使其接收机切换到保护路径。APS协议以如下方式进行协调。当连接的一端节点检测到工作路径的一个信号故障时，它将切换到保护路径，并向另一端节点发送一个请求，以切换到保护路径。当端节点已经接收到该请求但尚未切换到保护通道时，它将切换到保护路径，并发送一条信息向另一端节点通报其当前保护倒换状态。

以太网可以采用带有ITU G.8032以太网环保护(ERP)的环结构来构建。ERP以一个更简单的环自动保护倒换(R-APS)协议替代生成树协议。R-APS采用环形拓扑来简化信息交换和计算，并最终减小保护倒换时延。

在以太网环保护中，环网中链路之一变成环网保护链路(RPL)。RPL在正常情况下阻塞以太网数据包，以避免路由环回。使网络拓扑像有效链路的一条路径那样，这是一种树状拓扑。通过RPL端节点来实现阻塞，即RPL端节点阻塞其连接到RPL的端口。端节点之一指定为RPL拥有节点。

当一条链路出故障时，端节点检测到故障后，将阻塞其通往该链路的端口。端节点将沿其他工作端口发送一个相关故障的信息。当RPL拥有节点接收到该信息时，该拥有节点将去除链路的阻塞。这就将拓扑恢复到通向有效链路的一条路径。

当故障链路修复时，端节点保持链路端口处于阻塞状态，并发送一个相关恢复的信息到其他工作端口。当RPL拥有节点接收到该信息时，它阻塞RPL。然后发送一个信息到已修好的链路的一个端节点，以去除对链路的阻塞。当该端节点接收到该信息时，它去除对已修好链路的阻塞。

6.3.3 IP保护

IP层历来提供尽力而为的业务。如3.5节所讨论，IP其本质上利用数据包的动态逐跳路由。每个路由器为每个宿点维护相邻下一跳路由器的一个路由表，输入数据包基于该路由表进行路由。如果网络中有一个故障，域内路由协议(OSPF或IS-IS)以分布式方式运行，并在域内每个路由器上更新其路由表。实际上，在检测到故障后至在所有路由器的路由表汇集并具有一致的路由信息之前，可能要花费数秒时间。在该过程中，数据包继续基于路由器的路由表当前版本选择路由，这些路由表可能是不一致的和错误的。它可使数据包错误地选择路由并可能在网络内造成循环。有可能在检测到故障后，数据包可能会丢失或经受数秒量级的长延时。即使在故障之后路由器决定沿备用路由传输数据包，数据包仍然可能在网络中循环，如图6.15所示。在该例中，考虑数据包以路由器D为宿路由器。假设链路CD出故障，则节点C将试图为以节点D为宿路由器的数据包选择通往路由器B的路由，期望找到到达路由器D的一条备用通道。但是，路由器B仍然认为到达路由器D的最佳方法是通过路由器C，并将该数据包路由回路由器C。这种情况一直延续到所有路由器的路由表全部汇集更新为止。

在故障后缓慢恢复是由于IP路由的根本性质，它是分布式的、基于下一跳的动态路由。为了避免缓慢恢复，通过采用更低层的协议保护，每条IP链路完全可以避免链路故障。因此，如果出现故障，则IP链路将在其本身链路上恢复而不需要改变IP路由。为使这一方法成功，单一IP链路的恢复时间必须比IP网络开始实施该恢复过程更迅速。例如，IP链路可

以通过具有 60 ms 保护倒换时间的保护 MPLS 隧道或 SONET 路径来实现。该时间对 IP 层来说可能太短了，以至于不能检测出链路故障。作为在 MPLS 上运行 IP 配置的一个例子，可以举出利用受保护的 MPLS LSP 相互直接连接的 IP 路由器的例子。请注意，这些 IP 路由器都处于网络的边缘，而核心网络完全由 MPLS 标记交换路由器(LSR)构成。

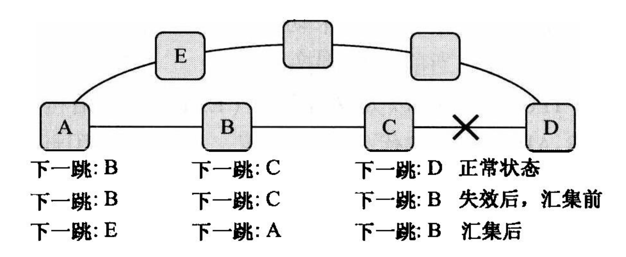


图 6.15 说明故障后 IP 网络中路由循环的例子。在所有节点上的路由表汇集到正确路由之前需要经过多次反复，同时可能还有路由循环

IP 层保护的其他问题首先是 IP 层检测故障所用的时间问题。在采用域间路由协议[AJY00]的典型实现方案中，相邻路由器之间定期交换"hello"数据包。如果路由器丢失若干"hello"数据包，则宣布该链路已经出故障并启动重路由。路由器通常默认每 10 s 发送 1 个"hello"数据包，如果连续丢失 3 个"hello"数据包，则宣布链路出故障。因此，检测一个故障可能花费多达 30 s 时间。该过程可以通过更频繁地交换"hello"数据包来加速。但是当前规定最小间隔为 1 s，更典型的是，核心路由器大约在 10 s 内检测到故障。作为另一种选择，可以定期交换另一组数据包来实现该目标[HYCG00]。然而这些包可以在缓存器中排队等候，如果有许多其他包正在等候，则必须在比正常数据包更高的优先级上处理。

另一种选择方案是依靠底层的 SONET 层或光层来检测故障并通知 IP 层。该方案可以通过路由器内的线路卡，向成帧与通信故障检测信息查阅路由协议来实现。然而，这还没有在其中设计当前的路由器。

6.3.4 MPLS 保护

MPLS 标记交换路径(LSP)可以通过快速重路由保护倒换来保护，它具有 60 ms 电信级保护倒换时间。在 MPLS 快速重路由中，沿一条受保护 LSP 的节点，具有一个预先计算好的备用 MPLS 隧道，该隧道开始于该节点、预防故障并沿 LSP 合入到受保护的下行 LSP 上。如果是下行的一跳，则备用隧道称为下一跳备用隧道；如果是下行两跳，则备用隧道称为下-下一跳备用隧道。下一跳备用隧道使 LSP 免于出现链路故障，而下-下一跳备用隧道使 LSP 免于出现节点与链路故障。

备用隧道的起点称为本地修复点(PLR)，而其终点称为合入点(MP)。MPLS 保护隧道的一个例子如图 6.16 所示。其中，隧道的 PLR 为节点 A 而其 MP 为节点 C。该隧道是一个下-下一跳备用隧道，用于保护 LSP 免于在链路 AB 或节点 B 上出故障。如果出现其中一个故障，则节点 A 将检测到该故障并将把 LSP 的流量切换到该隧道。由于故障检测属于本地，因此保护倒换时间可以很短，在数十毫秒范围内。

要得到充分的保护，一条 LSP 可以有许多保护隧道，每条隧道对应于每个可能的故障点。一条 LSP 可以有多达 H 条备用隧道，其中 H 为路径的跳数。图 6.17(a)和(b)分别介绍

了仅有单一链路故障和单一节点故障时的 MPLS 保护隧道例子。请注意，图 6.17(b)中宿节点之前的那个节点只需要一条下一跳备用隧道。

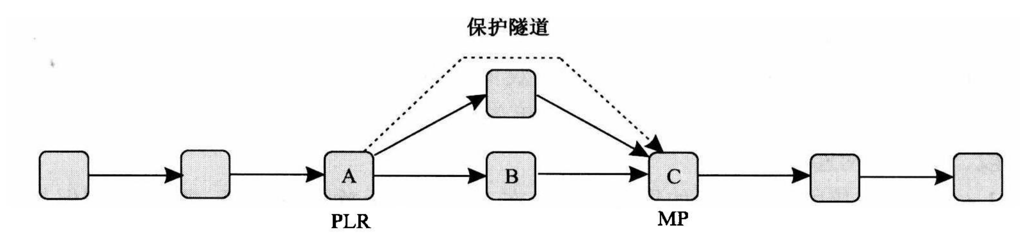


图 6.16　链路 AB 的 MPLS 快速重路由保护隧道，其中 PLR 为节点 A 而 MP 为节点 C

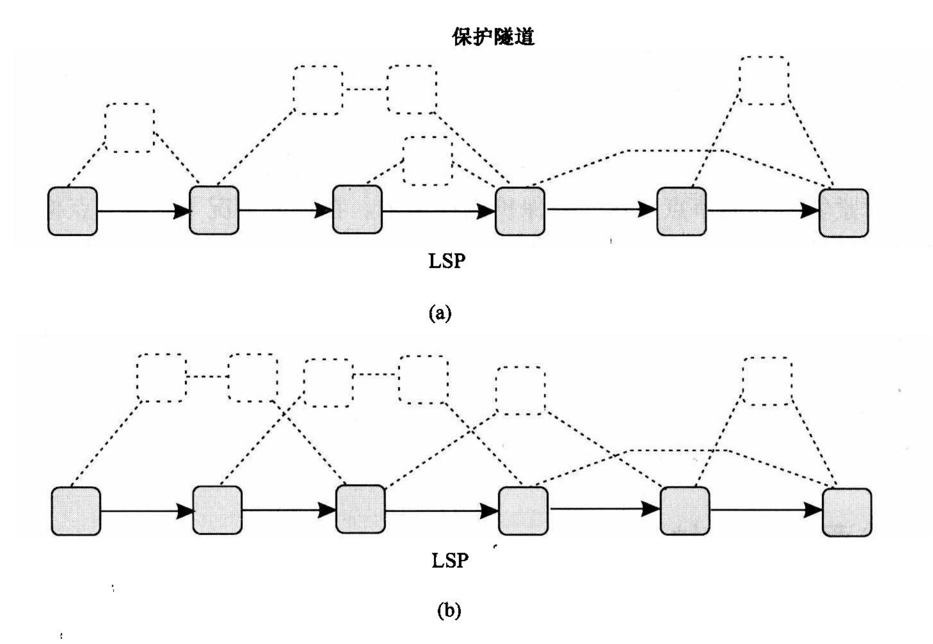


图 6.17　MPLS 快速重路由保护隧道图例：(a)单一链路故障的下一跳与下-下一跳混合的备用隧道；(b)单一节点故障(除末尾的备用隧道之外)的下-下一跳备用隧道

有两种 MPLS 快速重路由实现方法：一对一备用方法和设备备用方法。对于一对一备用方法，每条保护隧道通过建立一条 LSP 来实现，称为绕道。当一个绕道本地修复点(PLR)检测到一个故障时，PLR 将转移流量远离故障，并切换到绕道隧道。它还将置换数据包标记，留下绕道标记。流量沿绕道隧道一直到达绕道的合入节点。该合入节点将识别绕道标记并把流量切换回到 LSP。这一过程也置换数据包标记，留下 LSP 的标记。

设备备用方法利用 MPLS 标记栈的优点。保护隧道也是通过 LSP 来实现的，但是它可供多条 LSP 使用。该隧道被称为旁路隧道。采用图 6.16 作为一个例子，其中保护隧道是一个旁路隧道。当 PLR A 检测到一个故障时，它将转移流量远离故障，并切换到旁路隧道，再把保护隧道标记推进数据包标记栈。流量沿旁路隧道一直到达该隧道的合入节点。在此处，把旁路隧道的标记从包标记栈去除，并且流量继续在 LSP 上传送。穿过节点(A、B、C)的任何一条 LSP 都可以利用该条旁路隧道。设备备用方法的一个优点是减少了网络中 LSP 的数量。

传送 MPLS

传送多协议标记交换(T-MPLS)保护方案是专为运营商网络而设计的。所规定的两种方案是路径保护倒换(线性保护)和环网拓扑保护倒换。

路径保护倒换有 1 +1 单向连接和 1∶1 双向连接两种方法。如果采用连续报文信息("hello"信息),则该信息发送到工作和保护两条路径上。保护倒换也可以应用于保护连接的某一段,称为子网连接。

在 1 +1 单向连接的情况下,如果宿端节点在工作通道上检测到故障,则切换到保护通道。而对于 1∶1 双向连接,故障需要端节点之间进行协调,因此需要一项 APS 协议。当一个端节点在工作通道上检测到故障时,则切换到保护通道,并向另一个端节点发送一条保护倒换请求。当另一个端节点接收到该请求时,切换到保护通道,并发送一条信息将其行动通知头一个节点。

T-MPLS 环保护倒换有两种方式:环回方式和源路由方式,这与 RPR 保护重路由类似(见图 6.13)。每条工作 LSP 在环中反方向上有一条保护隧道。对于环回方式,保护隧道沿环形成一个完全的封闭回路。工作 LSP 及其保护隧道都可以置换标记。当节点检测到一个故障时,它向故障紧邻的其他节点发送一条保护倒换请求。在环回情况下,当节点检测到一个故障或一条保护倒换请求时,它把流量切换到保护隧道。在源路由情况下,LSP 的源节点和宿节点切换到保护隧道。

要注意,MPLS 快速重路由也可以用于环网拓扑中。可以在文献[YS08]中找到 MPLS 快速重路由与 T-MPLS 环保护两种方法的比较。T-MPLS 环保护由于 APS 及其配置的复杂性而有较高的复杂性,但是它可以保持数据包的次序。而 MPLS 快速重路由存在数据包失序的可能性。

6.4 为何要光层保护

光层为其客户层,如 SONET、IP 和 10 千兆以太网,提供光路应用。已经看到,SONET 层和其他客户层有大量的保护机制。这些层都设计成相互独立地工作,也不依赖于其他层的可用保护机制。下面将看到,尽管在客户层有保护机制,但是对光层提供保护有强烈的需求。

- SONET/SDH 网络包含大量的保护功能。但是其他网络,如 IP 网络,不能提供同样等级的保护。如 6.3.3 节所述,绝大部分 IP 业务是尽力而为的业务。保护数据网的一种方法是依靠光层保护,这是有相当高成本效益和效率的。
- 通过利用光层的保护,而不是客户端层保护,可实现重大的成本节约。下面通过两个例子来说明。

  考虑具有承载更高层业务的光路的一个 WDM 环网的例子。图 6.18 举例说明了没有光层保护的情况。两个 SONET 线路终端(LTE)通过光层所提供的光路相互连接,两个 IP 路由器也是一样。为简单起见,观察从 LTE A 到 LTE B 的一条单向光路和从路由器 C 到路由器 D 的另一条光路。这两条光路分别由 SONET 层和 IP 层采用 1 +1 保护方式来保护。从 LTE A 到 LTE B 的工作连接建立在沿环中最短路径的波长 λ_1上,其他保护连接也建立在如环中相同的波长 λ_1上。同样地,从路由器 C 到路由器 D 的

工作连接可以建立在该最短通道的波长λ_1上。然而，从路由器 C 到路由器 D 的保护连接需要沿环选择路由，必须另外分配一个波长，比如λ_2。因此，需要两个波长来支持这一配置。

图 6.19 显示了通过光层来实现保护可以获得的好处。现在，可以不再考虑 SONET LTE 和 IP 路由器中的单独 1 +1 保护，而让它们共享环网中一个共用保护波长。只需要一个波长来支持这种配置。但是，要注意该方法只能处理单条链路中断，而图 6.18 的方法能够处理一些组合的多光纤中断(见习题 6.11)。同样地，图 6.18 的方法可以支持两个发射机同时出故障，而图 6.19 的方法只能支持单一发射机出故障。然而，如果主要兴趣在于在任何给定时间内处理一个故障，图 6.19 的光层保护方案提供了明显的节约能力。

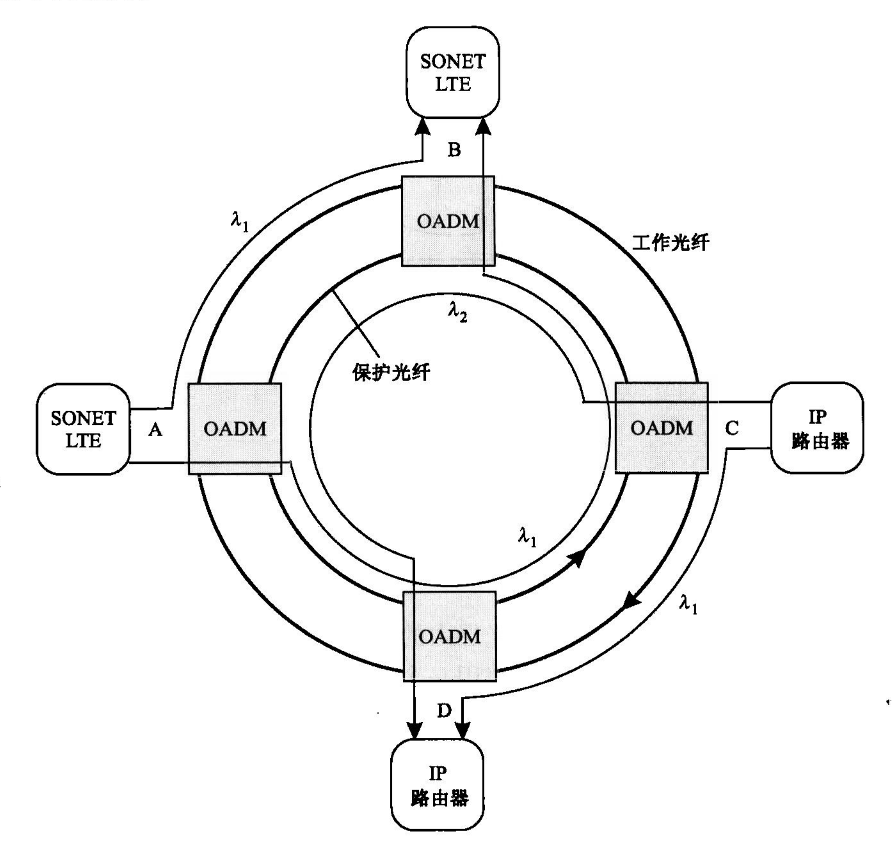


图 6.18　采用光分插复用器(OADM)构建的 WDM 环网。该网分别利用由 SONET 层和 IP 层提供的保护来支持两个互连的SONET线路终端(LTE)和两个互连的IP路由器。SONET和IP并不共享保护带宽

设想如果必须支持环中相邻的 N 对这样的客户层设备(N 为环中链路数)，情况又将如何？如果没有光层保护，则需要 N 个保护波长。如果有光层保护，则只需要一个保护波长。光层保护更有效，这是因为它共享了穿过多对客户层设备的保护资源。相比之下，客户层保护机制在不同的或独立的客户层之间不能共享保护资源。

运行在 WDM 链路上的 IP 网络的另一个例子如图 6.20 所示。考虑两种网络结构方案。图 6.20(a)描述了由两个不同路由的 WDM 链路来互连的 IP 路由器。在这种情况下，

光层保护没有保障，IP 层完全处理光纤中断及设备故障(如路由器端口故障)的保护。请注意，该结构在每个路由器上需要 3 个工作端口和 3 个保护端口。

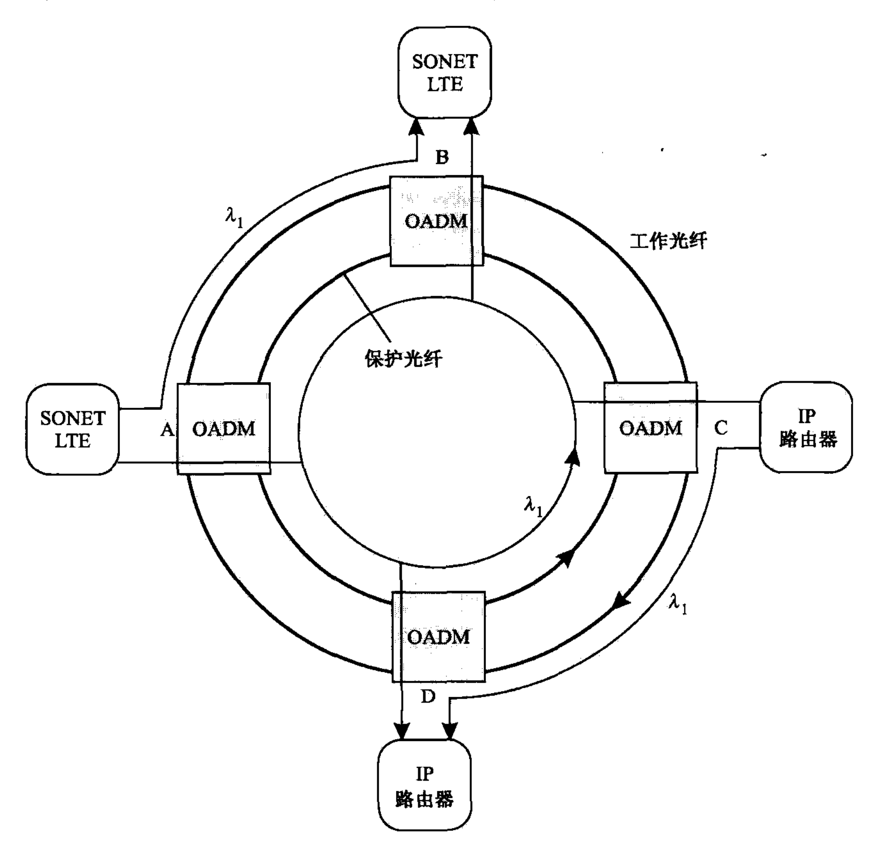


图 6.19 光层保护的好处。该结构与图 6.18 相同。然而现在光层采用环中一个波长来保护SONET连接和IP连接

图 6.20(b)表明了一种实现与光层内的保护同样能力的网络的更佳方法。在这种情况下，光层负责处理光纤中断。使用一个简单的桥接与切换装置来连接同一 WDM 系统中的两条不同路由的光纤对。一般情况下，由光层处理光纤中断是一种更有效的方法，因为单一切换器处理了所有信道的恢复，而不是每个单独的 IP 链路处理其本身的恢复。更重要的是，该方法明显节约了设备成本。与上一种结构相比，该结构每个路由器只需要 1 个保护端口而不是 3 个。如果路由器中其中一个工作端口出故障，则该路由器直接将流量切换到保护端口。要注意，光层不能处理这种类型的故障。

该例子还强调了光层保护的另一个价值。路由器端口的成本通常明显高于光层设备的每个端口的成本。为此，在光层中预留保护带宽(有效地预留光层设备端口)比在 IP 路由器增加端口将更便宜。

- 光层可以比客户层更有效地处理一些故障。WDM 网络在单芯光纤上承载数个波长的流量。如果没有光层保护，光纤中断导致的每条信息流由客户层独立地恢复。另外，网络管理系统充塞了这一故障的大量告警。而如果采用光层来恢复这种故障，则较少流量需要重选路由(即使流量较大)，因此其过程更快速、更简单。

- 光层保护能用于网络中提供某些额外的弹性度，如保护多个故障。一个例子如图 6.21 所示。考虑工作在光层所提供的光路上的 SONET BLSR。图 6.21(a)描述了网络正常状态，图 6.21(b)描述了链路故障发生时 SONET 某一连接会发生什么情况。BLSR 会进行环倒换并将该连接沿环重路由。此时，在修复故障链路之前，网络不能处理另一个故障。修复一条故障链路可能要花费数小时到数天时间，这是相当长的，而在此期间网络很容易出现其他故障。光层保护可以消除这种脆弱性。在图 6.21(c)中，光层将故障链路上的光路重选路由到故障周围的另一条光的路径上。此时，就 BLSR 而言，故障链路好像已经恢复，环又恢复到正常状态。这使得 BLSR 能够在故障链路实际修复过程中同时处理其他故障。

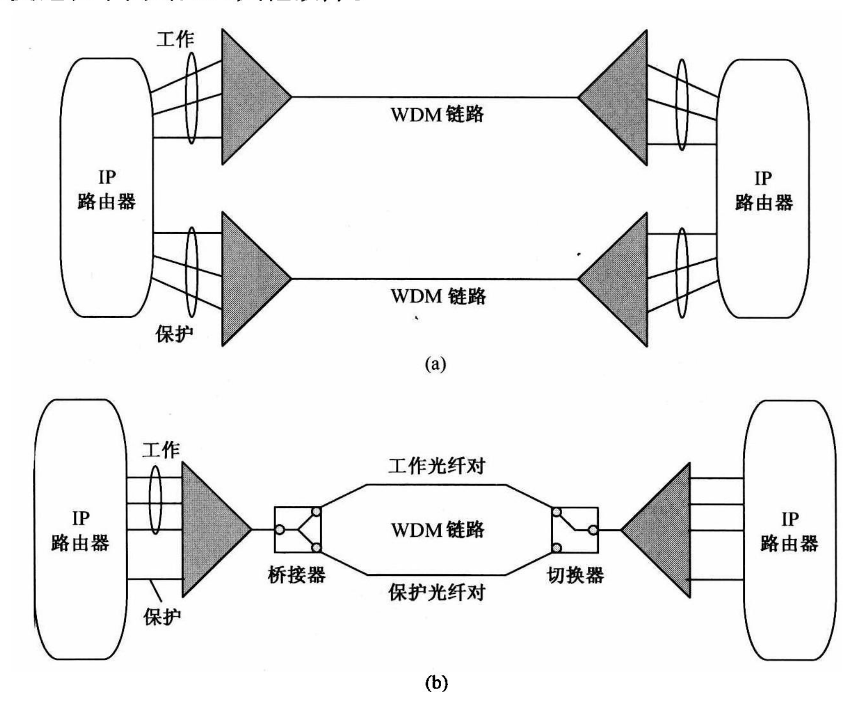


图 6.20　表明光层保护优于 IP 层保护的例子。(a)路由器处理所有保护。使用两条不同路由的WDM链路。每个IP路由器使用3个工作端口和3个保护端口来保护光纤中断和设备故障；(b)采用一个独立的WDM线路系统，它可以保护由光层所负责处理的光纤中断。IP层负责处理设备故障。IP路由器使用3个工作端口和另一个保护端口，以保护其中一个工作端口故障

- 最后，目前 SONET 保护是基于环(UPSR/BLSR)的。基于环的方案需要预留给保护的网络容量，与工作流量的容量相同。在光层内，多种基于网状的保护方案正在开发中。与比基于环的方案相比，这可明显地减小用于保护的容量。诚然，这些方案也可以应用于 SONET 层。

但是，光层保护有如下限制：

- 不是所有故障都能够通过光层处理。如果连接客户层终端中的一个激光器出故障，则光层就无能为力。因此，客户层设备的故障需要由客户层处理。
- 光学层未必能够检测到启动保护切换的相应条件。例如，透明网络只能监控功率(以

及在某些情况下还有光信噪比)存在与否。尽管还可以测量功率劣化，但是它不知道功率水平的合理值，因为功率水平的变化极大地依赖于所承载信号的类型。因此，它只能检测到光丢失后才来触发保护倒换。误码率是更精确的信号质量指标，但透明网络可能无法测量误码率。

- 光层以光路为单位来保护流量，并且它不能保护光路中的某一部分流量，也不能保护其他部分的流量。这种功能需要由客户层来实现。
- 光层的保护路由可能比主路由更长，以及由于链路预算因素，备用路由的选择可能严重地受限。
- 需要小心注意不同层之间保护方案的互通。这样的问题将在6.6节中讨论。

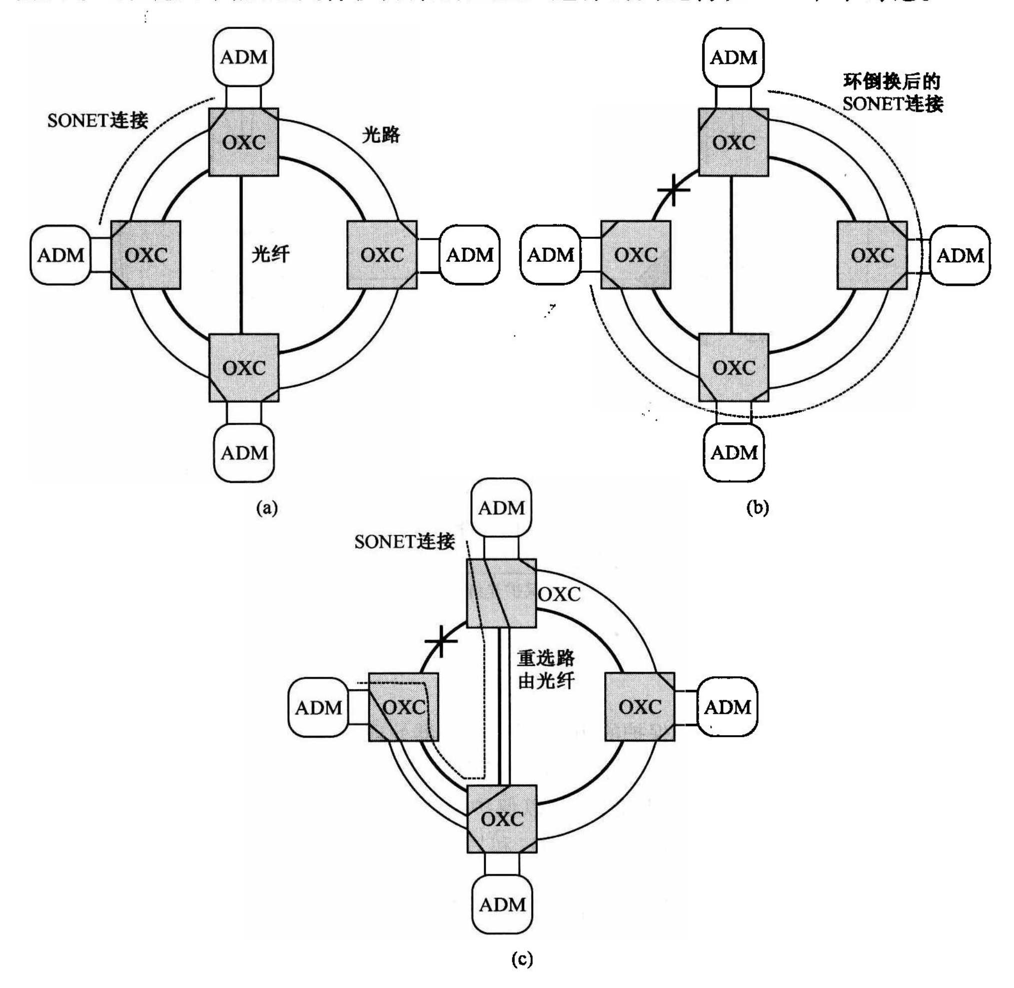


图6.21 光层保护用于增强SONET保护。其中，粗线表示光纤链路，细线表示在SONET ADM之间的光层所提供的光路，虚线表示SONET连接。(a)故障前的正常状态，SONET环采用光层所提供的光路来实现；(b)由于光纤故障，连接两个相邻SONET ADM的一条光路不能工作，引起SONET ADM启动环倒换而快速恢复SONET连接；(c)光交叉连接(OXC)实施光层恢复并在故障周围重选光路路由。对SONET环来说，故障好像已经恢复，环又恢复到正常状态，准备应付另一个故障

6.4.1 基于保护的业务等级

在第 5 章中看到了光层可以根据所提供的保护类型来提供多种业务等级。这些等级的主要区别在于所提供的连接可用性级别和连接的恢复时间。不同等级将可能采用不同的保护方案来支持。用户和业务提供商的成本也将依赖于业务可用性。可能的业务等级如下：

白金级。与 SONET/SDH 保护方案相比，它提供最高级的可用性和最快的恢复时间，典型值约为 60 ms。例如，专用 1 + 1 保护方案可以用于提供这类业务。该等级可视为白金级业务并相应地定价。

金级。它提供高可用性和快速恢复时间，典型值为数百毫秒内。例如，共享网状保护方案可以提供该业务等级。

银级。该等级的可用性和恢复时间在金级之下。例如，尽力而为恢复的保护方案纳入该类别。另一个例子是，出现故障时从头开始重试的方案。

铜级。光层提供无保护的光路。在工作路径发生故障的情况下，该连接将丢失。

铅级。该等级业务在所有等级中其可用性和优先级最低。例如，可以采用预留给其他等级业务的保护带宽来支持该等级。如果该带宽需要用于保护其他更高优先级的业务，则该等级的连接将被抢占。

何种应用类型将采用这些业务等级，依赖于应用本身和用户。由于高可用性的期望，电话采用白金级业务。SONET/SDH 是当前白金级业务的一个例子。商业客户也采用白金级业务，因为他们转而提供需要高可用性的业务。

互联网路由器与互联网业务提供商之间互连的运营商有时提供白金级业务，其他情况则提供铜级(无保护的)业务。对于后者，IP 层处理所有恢复功能；对于前者，相当可能在更低质量业务的光路上承载一些业务。更低质量的业务意味着更低的成本，这更适合于更关注低成本(与高可用性相比较)的普通客户。

由于已经看到了互联网的历史，新型客户应用和业务一直在创新与发展，他们有不同的可用性和成本的要求。重要的是，要具有一些保护业务，不仅满足当前的应用需求，而且满足不可预见的未来应用。

6.5 光层保护方案

接下来研究不同类型的光层保护方案。从概念上讲，这些方案很大程度上类似于 SONET 和 SDH 的相应方案。但是，它们的实施基本上是不同的，有几个原因：WDM 链路的设备成本随复用与终接的波长数的增加而增加；设计保护方案时，需要考虑链路预算的限制；可能涉及波长转换限制等。

在第 5 章已看到，光层由光信道(OCh)层(或路径层)、光复用段(OMS)层(即线路层)和光传输(OTS)层组成。就像 SONET 保护方案既适用于线路层(如 BLSR)又适用于路径层(如 UPSR)一样，光保护方案也属于 OCh 层或 OMS 层。OCh 层方案每次恢复一条光路，而 OMS 层方案恢复链路上的全部光路，而不能独立地恢复单一光路。表 6.3 汇总了运行在光复用段

层上的方案。表6.4汇总了运行在光信道层上的方案。这些方案尚未标准化，并有许多不同版本。我们已尝试使用与 SDH 术语一致的术语。

表6.3 运行在光复用段(OMS)层的光保护方案汇总。其中专用保护环(DPRing)和共享保护环(SPRing)是可以实现的

	保护方案			
	1+1	1:1	OMS-DPRing	OMS-SPRing
类型	专用	共享	专用	共享
拓扑	点对点	点对点	环	环

表6.4 运行在光信道层上的光保护方案汇总

	保护方案		
	1+1	OCh-SPRing	OCh-Mesh
类型	专用	共享	共享
拓扑	网状	环	网状

在 SONET 中，在路径层独立地处理每条连接来替代在线路层同时处理所有连接，这没有相关的明显成本的问题。原因是其处理采用专用的集成电路，其中处理路径层的增量成本与线路层相比并不明显。相反，OCh 层方案的成本与 OMS 层方案相比有明显差别。OCh 层方案必须对所有波长解复用，而 OMS 层方案运行在所有波长上，因此需要更少的设备。

作为一个例子，考虑如图6.22所示的两种保护方案。图6.22(a)描述了1+1 OMS 保护，而图6.22(b)描述了1+1 OCh 保护。OMS 方案需要两个 WDM 终端和另一个分光器与光开关。另一方面，OCh 方案需要4个 WDM 终端，以及每个波长一个分光器与光开关。因此，其设备成本高于 OMS 方案。其实，这是所有信道都要保护的情形。但是如果不是所有信道都需要保护，则 OCh 层保护的成本可以降低。假设复用器、分光器和光开关能够随波长的增加而添加，则 OCh 保护的成本随其所保护的信道数的增加而线性增加。另一方面，OMS 保护方案的成本与所保护的信道数无关。如果只有一小部分的信道要保护，则 OCh 保护不比 OMS 保护明显昂贵。

保护方案的选择主要由所支持的业务等级(如下所述)和所配置的设备类型来决定。对于 SONET/SDH，保护主要由 SONET/SDH 线路终端(LTE)和分插复用器(ADM)来实现，而不是由数字交叉连接设备来实现。这主要是因为数字交叉连接设备在实现快速保护方面比 LTE 和 ADM 效率更低，以及部分因为其运行在更低速的支路上。但是，可能看到在光层的保护功能处理起来有点不同。复用设备(如光线路终端和光分插复用器)在线性或环结构中可以提供 OCh 层和 OMS 层保护。另一方面，光交叉连接在线性、环和网状结构中可以提供保护。不像 SONET/SDH 中的相应的数字交叉连接那样，光交叉连接设计得提供有效的保护。根据交叉连接的类型(见4.4节)，保护可以在光信道层上实现(用于交叉连接在波长级梳理)，也可以在 STS-1 上实现(用于电核心交叉连接在 STS-1 上梳理)。所以，一种可能性是使用简单的无保护的 WDM 点到点系统，并依靠光交叉连接来实现保护功能。对于处理大量波长的骨干网络，可以选择该方案。已经在其网络中大量配置了无保护的 WDM 设备的运营商，也可以选择该方案。另外一种可能性是依赖于 WDM 线路终端和分插复用器来实现该功能。使用少量信道且不需要使用交叉连接的城域网，可以选择这种方案。

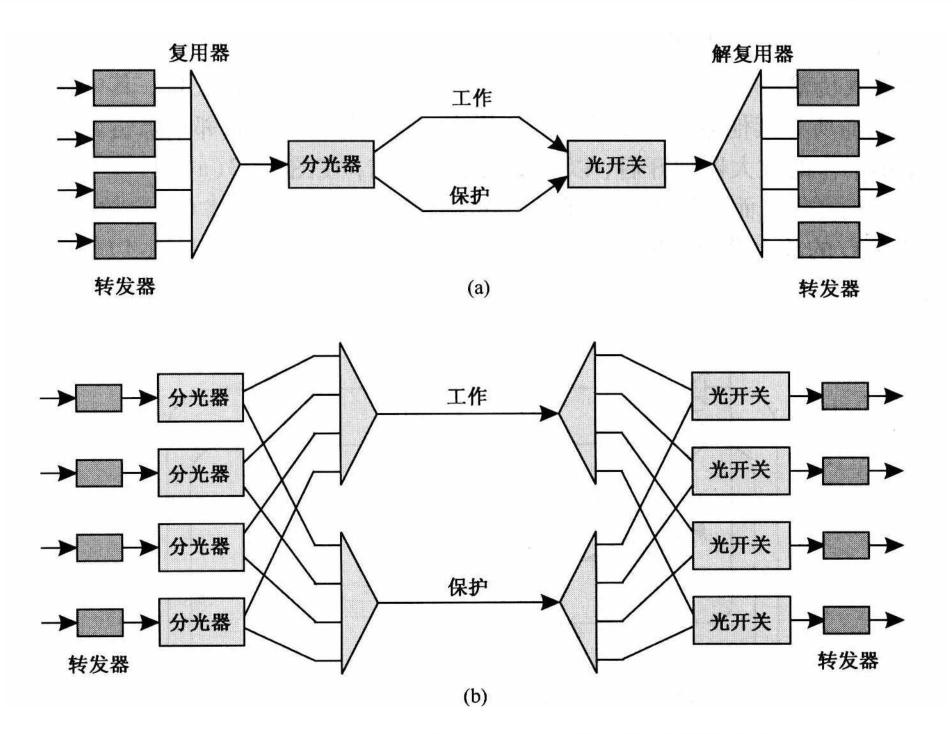


图6.22 (a) 1+1 OMS与(b) 1+1 OCh保护方案的比较

6.5.1 1+1 OMS保护

1+1 OMS保护方案也许是最简单的光层保护方案[见图6.22(a)]。由于其简单性，一些厂家在其OLT上实现了该方案。利用分光器将WDM混合信号桥接到两个不同的路径。在另一端，根据光信号是否存在检测，用光开关选择两路信号中更好的一路信号。光分束会造成3 dB的附加损耗，光开关也增加了一小部分损耗(小于1 dB)。一种可供选择的实现方法是在每一芯光纤上采用光放大器和在接收机上采用一个无源合波器来合成两个方向的信号。在任何时候，一个放大器开启而另一个放大器关闭。这样做的优点是避免了系统中单点故障(在其他方法中采用的是选择器切换)，但成本可能较高。

6.5.2 1:1 OMS保护

1:1 OMS保护方案类似于6.2.1节中讨论过的SONET的1:1方案。其优点也类似，即支持低优先级业务和具有N个工作系统共享单一保护系统的能力。与图6.22(a)中的1+1方案相比，一种典型的实现方法是在发射机上采用一个光开关，而不是分光器，使路径上总损耗更低。就像SONET情况一样，需要APS协议来提供链路两端之间的协调。

6.5.3 OMS专用保护环

OMS专用保护环(OMS-DPRing)除了其运行在OMS层(或光线路层)，而UPSR运行在SONET路径层外，都类似于SONET UPSR。也可以认为它是光单向线路倒换环(ULSR)。

OMS-DPRing的一种可能的实现方法[Bat98]如图6.23所示。信号通过无源耦合器耦合

入环和耦合出环。每个节点在环的两个方向上传输。请注意，不同的节点必须采用不同的波长传输，否则其传输将会产生冲突。在正常状态下，环像总线一样工作，其中一对放大器在整个环上关闭而所有其他放大器都开启。如果有一个链路故障，紧邻故障链路的放大器将关闭，而初始不工作的放大器则开启，以恢复流量。例如，在图6.23(a)中，正常状态下节点A右侧的放大器对关闭，而其他放大器开启。在图6.23(b)中，当链路CD出故障时，在紧邻故障链路的节点C的放大器对关闭，在节点A上原来不工作的放大器开启，以创建一条新总线并恢复流量。

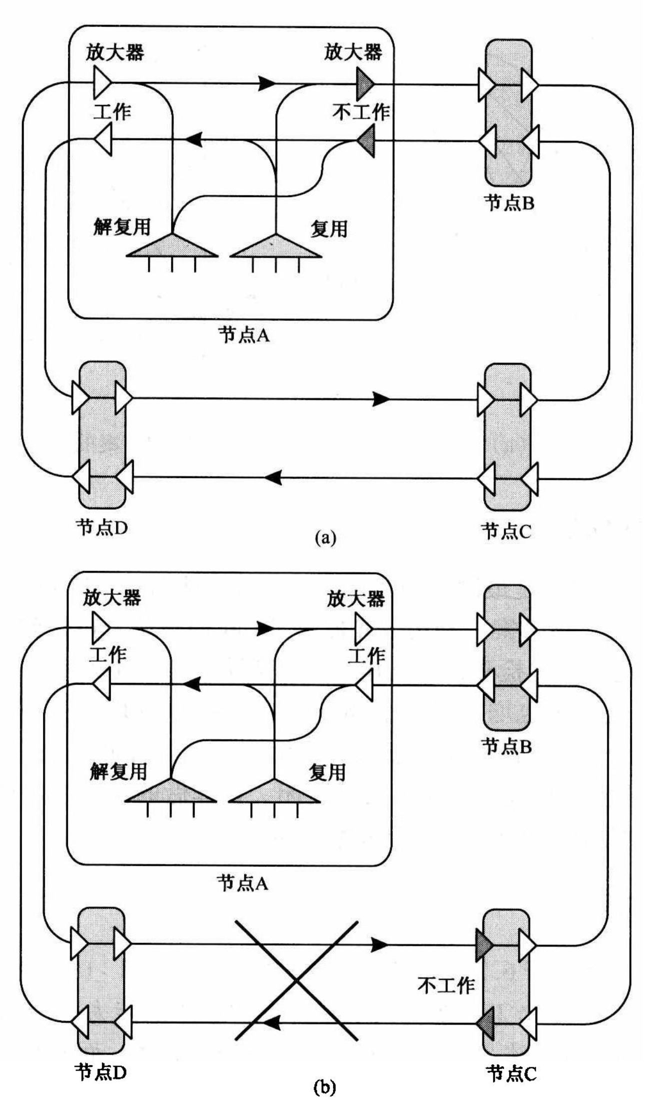


图6.23 OMS-DPRing保护。(a)正常运行状态：一对放大器不工作(关闭)而其他放大器开启，创建一条总线；(b)故障后，当前不工作的放大器开启而紧邻故障的放大器对关闭，以建立备用通道并恢复流量

6.5.4 OMS 共享保护环

OMS 共享保护环(OMS-SPRing)与 SONET BLSR/4 相似，但是有一些改变。四纤环的一种可能实现方法如图 6.24 所示。环中两芯光纤配置有 WDM 设备，其余两芯光纤用于保护，但是没有连接 WDM 设备。当一芯光纤中断产生时，信号既可以用跨距倒换到保护光纤，也可以用环倒换到保护光纤，如图 6.25 所示。对于这两种情况，保护光纤上都没有 WDM 设备，这对保护业务不仅节省了成本，而且使环中路径的损耗相对更低。在保护光纤上可能需要光放大器，但取决于链路损耗。

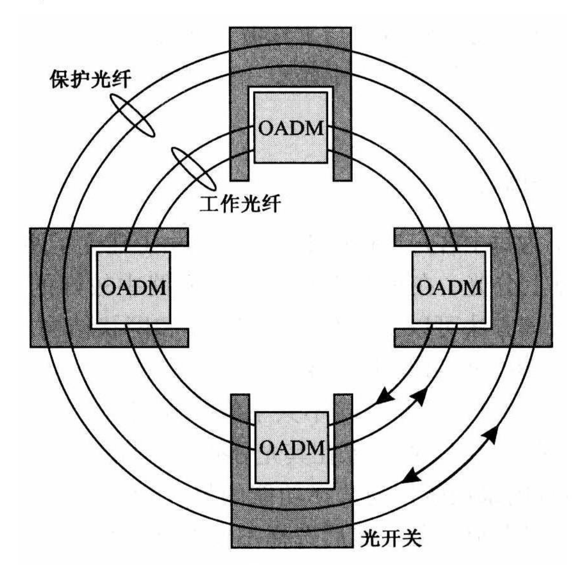


图 6.24　显示正常状态下的 OMS-SPRing。只有工作光纤连接到光分插复用器。保护光纤绕环连接

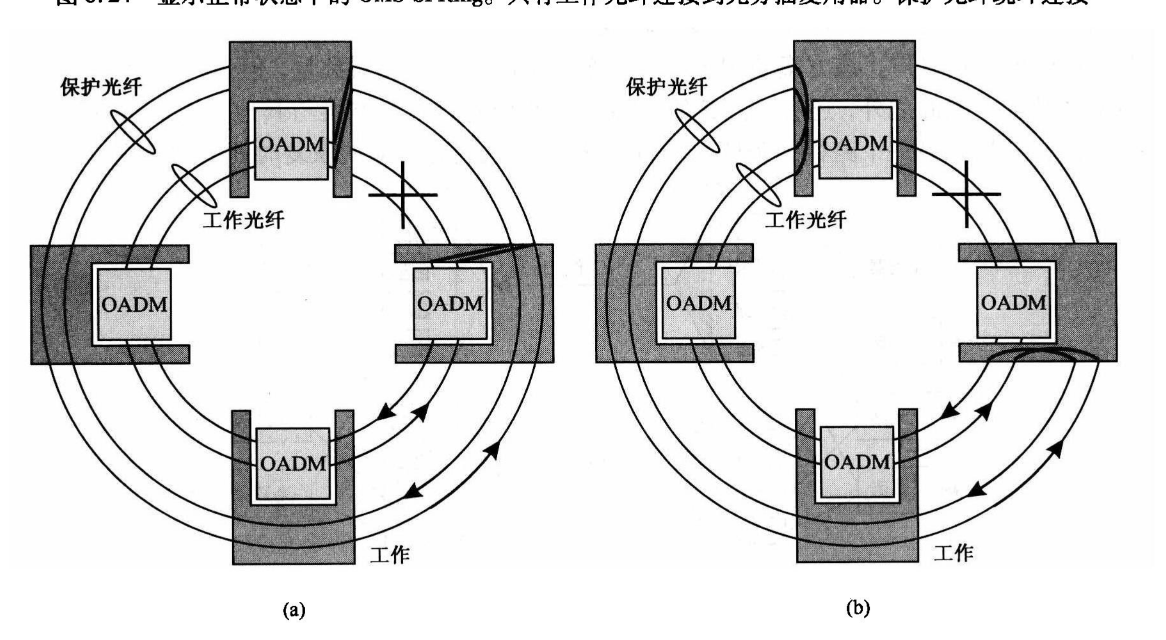


图 6.25　故障后的 OMS-SPRing。(a)跨距倒换；(b)环倒换

双纤 OMS-SPRing 也可以通过专用的、每芯光纤中的一半波长用于保护。通过确认一芯光纤上的保护波长对应于另一芯光纤的工作波长，信号可以重选路由而无须进行波长转换。但是，该方案在每个节点上的两组波长需要解复用与复用，因此不是严格运行在 OMS 层上。

6.5.5 1:*N* 波长转发器保护

上述讨论的 OMS 层方案可以处理链路故障和节点故障，但是不能处理终端设备故障，特别是波长转发器故障。波长转发器可以在 1:*N* 保护配置中利用为 *N* 个工作波长转发器提供一个备用波长转发器的方式来保护。要克服的一个问题是，当前的波长转发器都运行在固定波长上，因此备用的波长转发器将运行在与工作波长转发器不同的波长上。当信号切换到备用波长转发器时，还需要为新波长在网络中建立一条新光路，或者在备用波长转发器上采用可调激光器。

6.5.6 1+1 OCh 专用保护

在 1+1 OCh 保护中，为每个客户连接在不相交的路由上建立了两条光路。如图 6.22(b)所示，客户信号在输入节点上分光，在宿节点选择两条光路中较好的一条光路。与 SONET 和 SDH 一样，不需要信令。该方法可以工作在点对点、环和网状结构中。在环结构情况下，该方案也称为 OCh 专用保护环(OCh-DPRing)或光 UPSR。

像 SONET UPSR 一样，多个客户层连接不共享保护带宽，故该方法是带宽低效的。但是，这是一种最简单的保护方案，因此一些厂家在其光分插复用器和交叉连接上实行了该方案。

图 6.26 描述了在节点内采用桥接与选择功能的另一种可能实现的方法。进入光层的信号首先分光并发送到两个波长转发器，然后选择不同的路由穿过网络。在接收端，信号在两个波长转发器上终结，再选择较好的信号发送到客户。在图 6.22 中，客户信号经过波长转发器后再分光。在接收端，在发送到波长转发器之前，通过光开关选择两个信号中的一个信号，然后传送到客户。该方案使用了前一方案一半的波长转发器数量，但是不能保护波长转发器的故障。除此之外，还有一些其他的细微差别影响着一个方案与其他方案的选择(如从一个路径切换到另一个路径的条件)，还有两种方法之间有可能的恢复时间上的差别。

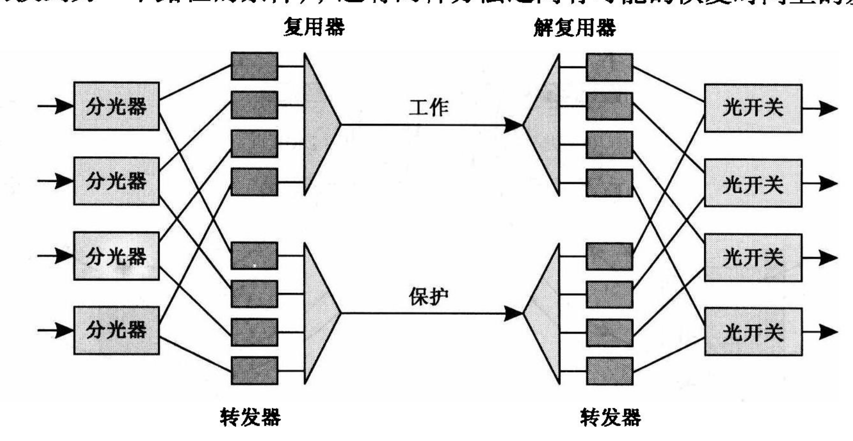


图 6.26 另一种 1+1 OCh 保护的实现方法。其中，客户层设备的输出信号先分光，再发送到不同路径上的两个波长转发器传输，在宿节点，通过波长转发器输出端的光开关选择较好的信号

6.5.7 OCh 共享保护环

OCh 共享保护环(OCh-SPRing)有点类似于 SONET BLSR/4。但是，BLSR 运行在线路(复用段)层，而该方案运行在光信道层而不是光复用段层。沿环最短路径建立工作光路。当一条工作光路出故障时，像 SONET BLSR/4 那样，既可以采用跨距倒换，也可以采用环倒换来恢复。对保护而言，环中不重叠的光路可以共享环中单一波长。对于分布式流量，这种空间重用使 OCh-SPRing 比 OCh-DPRing 更高效。OCh-SPRing 的运行基本上与图 6.5 ~ 图 6.7 相同，其中光纤相应于波长而连接相应于光路。正如 BLSR 一样，在环节点之间需要快速协调，以支持保护节点故障或低优先级流量。

6.5.8 OCh 网状保护

环结构本质上适用于稀疏物理拓扑，其大部分业务限于环内。许多骨干网络往往是更密集的环连接，基本上网状结构，流量被公平分配。一个典型的北美长距离运营商的骨干网络，如有 50 个节点，每个节点平均有 3 至 4 个相邻节点，一些节点甚至可能有 5 至 10 个相邻节点。对于这样的网络，网状保护方案比环网提供了更高效的带宽保护。网状网相对于环网的带宽效率依赖于几个因素，包括网络拓扑、流量模式和所用的网状保护方案类型。通常，拓扑越密集或越网状，网状保护的效益就越好。同样，如果网络中的流量主要是局部的，则环网就能做好。相比之下，如果网络中的流量是分布式的，则环网效率低下，即许多光路需要划分为多个环，多环需要互连与保护，以支持这些光路。据报道，网状保护方案相对于环保护方案有 20% ~60% 的效率改善[RM99a, RM99b]。这里，提供一个简单的例子来说明网状保护相对于环保护的效率，一个更现实的详细的例子将在 10.2.6 节中看到。

例 6.1 考虑如图 6.27(a)所示的网络，它支持 3 条光路。假设所有这些光路需要保护，每条光路使用其所传过每条链路的一个单位的容量。

首先，假设采用 1 +1 OCh 专用保护。所建立的专用保护光路如图 6.27(b)所示。在这种情况下，该网络中需要 8 个单位的保护容量。

下面考虑采用共享环保护(OCh-SPRing)配置。这里，有一个有趣的问题，即如何配置环本身。一种解决方案是如图 6.27(c)所示来配置环。这种情况下，光路 X 和 Y 的每条光路共享相同的带宽用于保护，而光路 Z 有一个单独的环用于保护。该结构共需要 8 个单位保护容量，与上述专用保护相同。但是，要注意如果光路 X 和 Y 共享一个环，而光路 Z 采用专用保护，则保护容量可以降低到 6 个单位。用另一种方法看待该问题，就是采用 8 个单位容量，可以支持额外的光路，而这些光路可以共享用于保护光路 Z 的环。

现在考虑共享网状保护的情况。网状保护方案以如下方式运行。使用与 1 +1 方案所采用的保护光路路由相同的路由。较大的差别是，保护光路不用提前建立，只是当出现故障时才建立。只要两条光路不同时出现故障，就可以让它们共享网络中相同的保护容量。这种情况下，假设只处理链路故障，则在任何时间只可以有单一光路故障。因此，只需要提供足够的保护带宽，一次保护一条光路。下面留给读者来验证，如图 6.27(d)所示的情况只需要 4 个单位容量就足够了。

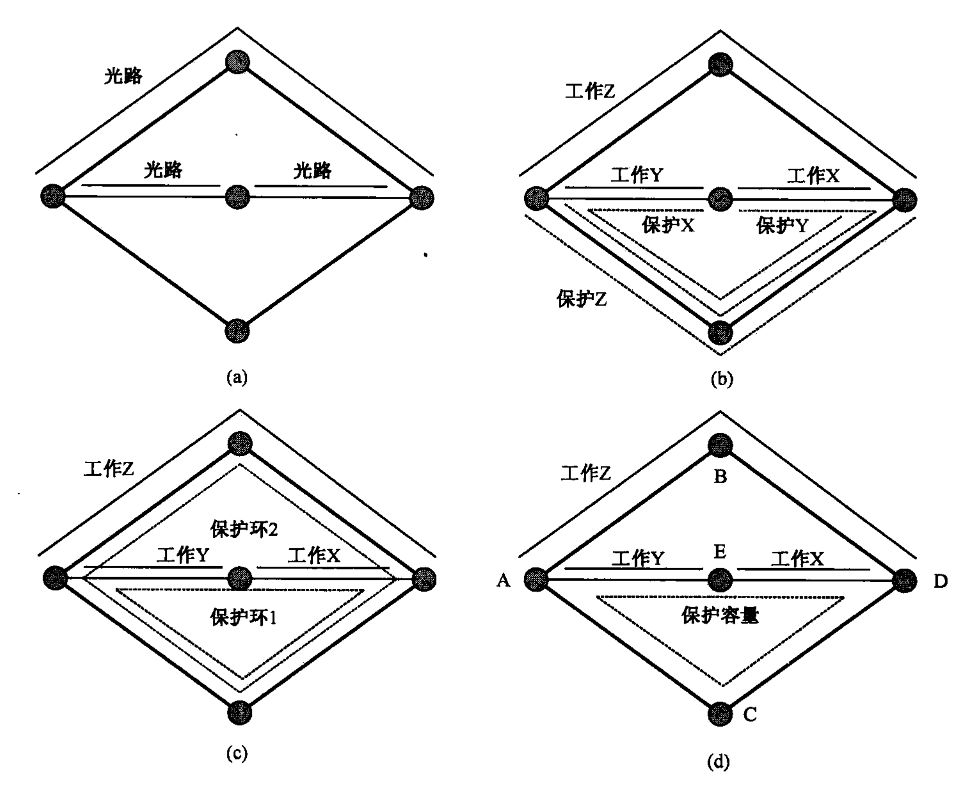


图6.27 说明网状保护相对于环保护的带宽效率的例子。(a)有3条光路的网状网;(b)采用1+1专用保护的光路保护;(c)采用OCh-SPRing保护的光路保护;(d)采用OCh网状保护的光路保护

网状保护方案并不是新的。早在20世纪80年代就用于网络数字交叉连接中。但是,这些保护方案是集中式的,并且运行相当缓慢,故障后需要数分钟到数小时才能恢复业务。同时,保护的管理相当复杂,也没有适用标准。在SONET/SDH标准化后,并且由于SONET/SDH提供了60 ms的快速环保护后,这些基于网状的恢复方案在很大程度上被弃用了。

但是,在网络的光层考虑采用网状保护方案有如下几个理由。

- 实现网状保护的强大处理能力在过去数十年间已经显著地增强,达到了可以快速实效计算增强功能(如确定新路由)的程度。网络控制的可用通信带宽也显著地增加。为了保护网络提供Tb/s的能力,在网络中为控制流量而提供一些2 Mb/s或45 Mb/s的专用线路是相当合理的。现在已经不是过去的情况了,那时在网络中该带宽量相对于实际流量来说可以认为是很大的。
- 光交叉连接和其他光层设备以比运行在DS1或DS3的数字交叉连接更大的粒度(光路)上来保护带宽。因此,它们使用更少的管理与保护设备,但是这种情况将随着流量的增长而变化。
- 为其他类型的数据网络已经开发了相对快速的信令与路由协议,如IP网络,许多这类协议能够适应于光层的使用。
- 60 ms保护时间的要求不是一个硬性的数字。关注保护数据业务的许多运营商满足于数百毫秒级的保护时间,这更容易实现更复杂的保护方案。

除了上述讨论的因素外，为使网状保护方案得到广泛应用，必须解决如下一些关键问题。

- SONET/SDH 保护已获得这样成功的部分原因是保护方案已标准化。网状保护方案的标准化也已经开始进行。
- 基于环的方案的一个优点是网络划分为多域，每个域独立地实行保护，因此网络的某部分不会影响其他部分。这意味着只要故障出现在不同域，网络就可以同时处理多个故障。而且，网络的一个部分可以在不影响其他部分的保护方案情况下实施维护。为了充分获得网状保护的效益，需要把网络作为完整的一个域。除非这一个域相当大，否则把网络拆分成更小的域会降低带宽效率。

  该问题的另一个方面是软件错误或操作者失误所带来的影响。在基于环的网络中，这类问题是局部化的，而在网状网络中，这类问题会带来全网性的影响。

- 网状保护方案的管理比环保护方案更复杂。为了使之成功，厂家需要为运营商提供合适的管理工具，对网络运营商隐匿其复杂性。例如，这可能意味着提供自动工具来规划和计算网络中的主路由和保护路由，这是相当复杂的工作。

但是从有利的方面看，环互连也是相当复杂的，而网状保护能使网络更灵活地规划容量。容量不需提前确定，而是能够按照接入网络的需求来指配。

- 效率更高的网状保护方案需要快速的全网性信令机制来传输与故障相关的和由故障所造成的光路重路由的信息。这就意味着实施保护倒换的节点必须周密地设计，以使处理时延最小化。
- 效率更高的网状保护方案需要在节点上维护保护路由表。这些路由表提供网络拓扑和网络保护路径的相关信息。当网络中添加或删除光路、链路或节点时，路由表需要更新。最重要的是，这些表需要在网络中的所有节点之间保持一致。

  这些保护路由表类似于 IP 网络中所维护的路由表，这些 IP 路由表甚至在数千个节点的大型网络中也能很好工作。但是，必须认识到 IP 网络中的路由表并不总是一致的。如果路由表不一致，网络出现路由异常（如出现环回）的可能性相当高。例如，在 1995 年底互联网出现主要路由异常的可能性为 3.3% [Pax97]。这些异常造成网络错误地转发数据包，不过这些数据包最终找到了到达其宿节点的方式，或被网络丢弃。对于后一种情况，数据包可以通过一个更高层的协议（TCP）来重传。虽然该方法在 IP 网络中工作正常，但是不能承受传送网的路由异常，因为这些异常在出故障后会阻止流量的恢复。因此，需要确立快速和可靠的拓扑更新机制，以维护保护路由表。

现在就来看看不同的网状保护。一方面，是将整个网络看做单域来保护，还是将网络拆分为多域，其中每个域单独进行保护并将不同域联系在一起。退一步来说，每个域可能是一个单环，这就使我们回到了基于环保护的通常模式。

区分保护方案的另一个重要方面是，保护路由是预先提前计算（离线）还是在故障出现后计算（在线）。在这两种情况下，另一个需要考虑的方面是分布式实现的程度。它会影响所需的信令协议的复杂性，并直接影响恢复速度。

首先，考虑预先计算保护路由的情形。这种情况下，光路的保护路由在光路建立时计算，并保存在网络中。所有链路都分配足够的带宽，以确保在可能发生故障时光路可以恢

复。(注意,该保护带宽仍然是许多光路共享,而不是单一光路专用的。这是1+1专用保护与共享保护之间的明显区别。)根据所用方案的复杂程度,对于某一特定的光路,根据实际故障的情况可能有一条或多条可能的备用路由。例如,最简单的情况是计算一条通过网络的不相交的路径作为保护路由。或者,还可以基于网络某些链路故障来使用多条保护路由。显然,在网络中需要保存的信息量取决于每条光路的保护路由数量。

在该方案的集中式实现中,如果出现故障,就通知网络中央控制器。然后中央控制器向所有受影响的网元发送信令,让它们按需重新配置光开关,就可为这些光路建立所有的备用路由。该方法的问题是中心控制器是一个单点故障,就通信与处理速度而言,可能是一个明显的瓶颈。

分布式实现方法的一些变体是可能的。在其中一种变体中,故障信息流向所有网络节点,然后每个节点基于所出现的准确故障来查阅其路由表,并重新配置其光开关。另一种可能性是向所有受影响的光路的源/宿发送故障信号,然后每对源宿通过向沿新路径的节点发送信令来建立备用路由路径。

接下来,考虑计算路由。这种情况是在发现故障后才计算新路由。这方面的一个主要问题是,网络是否有足够的带宽来处理所有需要恢复的光路。没有必需的预先计算的路由,就不可能先验地确定所需的保护带宽量。这种情况下,可能恢复一些光路而不恢复其他光路。

同样,该方案可以采用集中式或分布式方式来实现。分布式实现方法比预先计算路由的情况更复杂。有可能为了恢复两条互不相干的光路,各自运行的多个节点为获取同一链路或波长资源而产生冲突。这些冲突必须处理,从而使信令方案更复杂,恢复可能更慢。集中式实现方法可以避免这种冲突,但是与预先计算路由的集中式实现方法相比较,会遇到更糟糕的通信与处理方面的瓶颈。

基于迄今为止的讨论,可以看到网状保护需要如下功能:路由计算、拓扑维护及建立保护路由的信令。这些功能在IP网络中已经实现。例如,在IP网络中,路由计算采用Dijkstra最短路径优先算法,拓扑维护采用一种如开放最短路径优先算法(OSPF)的路由协议。信令已经用于建立MPLS网络的路径。一些信令协议可用于这一目的,包括基于流量工程扩展的资源预留协议(RSVP-TE)、专用网间接口(PNNI)信令协议[ATM96]和7号信令系统(SS7)[ITU93]。

通用多协议标记交换(GMPLS)是一种从MPLS协议扩展而来的用于光层控制的协议。在下一节将介绍它的一些生存性机制。

6.5.9 GMPLS保护

GMPLS支持跨距保护和路径保护方案。对于跨距保护倒换,有1+1单向、1+1双向和带附加业务的1:1双向。对于1+1保护倒换,端节点在工作链路和保护链路上传送其流量,当在工作链路上检测到故障时,将其接收机切换到保护链路。对于1+1双向保护倒换,检测到故障的节点向另一个端节点发送一个请求,要求切换到保护链路,而接收到该请求的端节点就切换到保护链路。这样,两个端节点将在保护链路上进行接收。

对于带附加业务的1:1跨距保护倒换,当一个端节点在工作链路上检测到一个故障时,它停止保护链路上的一切附加业务,并向其另一端节点发送一个保护倒换请求。当节点接收到该请求时,它停止一切附加业务,切换到保护链路,并向另一个端节点发送一个响应信息。

当那个端节点接收到该响应信息时，它停止使用工作链路，如果还没有使用保护链路，就开始使用。注意，在正常业务使用之前保护链路要清除其中的附加业务，以避免正常业务与附加业务之间的错误连接。

GMPLS 有共享 $M:N$ 保护倒换，其中，N 为工作链路数量，而 M 为保护链路数量。确定哪些链路需要保护的那个端节点称为主节点。

路径保护有 1+1 单向路径保护倒换、1+1 双向路径保护倒换和带附加业务的 $N:1$ 双向路径保护倒换。假定工作路径与保护路径不相交。除了由 LSP 中间节点向 LSP 的端节点发出信号故障通知外，这类保护倒换与 1+1 和 1:1 跨距保护倒换相类似。

GMPLS 支持路径段保护，可以保护 LSP 一些段。它只能用于保护 LSP 的一部分，或用受保护的段来覆盖 LSP 的方法来实现整条 LSP 的保护。它还支持具有预先规划重路由的网状保护倒换，但是不支持附加业务和完全重路由的保护机制。前者预先计算保护路径，而后者在检测到故障后才计算保护路径。

对于跨距保护倒换和通道保护倒换，RSVP 可以用于承载 APS 信息。对于跨距保护，APS 信息还可以用 GMPLS 链路管理协议或诸如 SONET/SDH APS 信令这样的数据面来承载。

6.6 层间互通

已经看到，保护功能可以在光层、SONET/SDH 层或业务层(IP/MPLS)上实现。网络中的保护在所有这些层之间应该如何进行协调呢?

不同层的保护机制默认是独立运行的。事实上，单一故障可能触发多种保护机制，它们都想同时恢复业务，从而导致大量无用的告警涌入管理中心。这样就造成分配给每层的保护带宽效率低下。

一个重要的问题是，不同层的保护机制可能会相互竞争，从而阻止或迟延了业务的恢复，尽管周密的设计可以消除这种事情的发生。下面的讨论说明了多层保护方案最终可以趋于相同，并在正确的判断下恢复业务。

考虑两个网络层，客户层运行在服务器层上，每层各有其自身的保护机制。如果满足下列条件，网络在故障发生情况下总能恢复业务：

1. 每层都有一条切实可行的保护路径。
2. 服务器层不依赖客户层来检测故障和激活其保护倒换功能。
3. 客户层保护是可恢复的。从这个意义上说，就是如果当前路径发生故障，则它会反复尝试切换到其他路径。

注意到，由于服务器层独立于客户层，并且当故障发生时不依赖于客户层的指示符，服务器层将检测到该故障并恢复业务。在故障出现后，有一段时间客户层不能恢复业务，因为服务器层正在激活其保护方案。最终，因为服务器层的处理，客户层将看到工作路径和保护路径对其都可用，因此其最终将趋于相同。

如果上述任何一个条件都不能满足，则保护方案就不可能趋于一致。例如，如果客户层保护是不可恢复的，则它一旦切换到保护路径，发现该保护路径不可用时，也不会切换回其主路径。

尽管希望在不同层的保护机制之间有某种协调，但不会总是这样。例如，不同层的保护机制实际上可以由不同节点来激活。在某些情况下，可能会增加优先级机制，即一个层试图想首先恢复业务，紧接其后是第二个层也在试图尝试。确保该机制的一种自动方法是，使某一个层中的恢复速度快到其他层感觉不到故障已经出现的程度。例如，考虑如6.3.3节所述的一个承载IP业务的WDM网络，IP层可能需要数秒才能检测到一个故障，光层在该时间范围内完全可以完成其恢复，使IP层无法检测到故障。但是，当SONET环运行在WDM网中时，该方法可能不行。SONET环检测故障非常快速，并可以在故障出现后2.3 μs就开始保护倒换。

实现有序恢复的另一种方法是在更高层试图恢复之前，强制性地为其设置另一个拖延时间，为更低层的恢复提供足够的时间。但是，较长的拖延将会增加总恢复时间，因此是不可取的。一般情况下，安排优先级是合理的，使该层能够首先提供最快的恢复尝试。

总结

生存性网络的设计在传送网中具有重要的作用。在SONET和SDH中已经很好地引入了保护技术，包括点到点、专用保护环和共享保护环。已在其他网络的客户层中应用或者正在开发这些保护技术。

点到点保护方案用于在节点间有不同光纤路由的简单系统中。专用保护环主要用于从远端节点到一个或两个枢纽节点的流量汇集。共享保护环可以用于流量非常分布的网络核心部分。

数据业务越来越多地直接在光层中传送，而不用SONET/SDH层，因此光层保护需要使用保护数据业务。对减小所需的保护带宽(通过共享穿过多个客户层的带宽)而言，光层保护也更高效，因此更具成本效益。

如果一些信道要保护而其他一些信道不要保护，则需要光信道层保护。光复用段层保护与保护所有业务相比，更有成本效益。与传统基于环的保护方法相比，光层的共享网状保护更有带宽效率和灵活性。

进一步阅读材料

在SONET和SDH网络保护方面有大量的文献。SONET环及其保护方案在ANSI T1.105.1、Telcordia GR-253与GR-1230中进行了描述。ITU G.841描述了等价的SDH结构。读者还可以参考Sexton和Reid [SR97]，以及Wu [Wu92]编著的书籍。

在IP和MPLS网络中，提供可靠的业务是当今一个极感兴趣的话题。已经制订了一些保护方案，这项工作仍在继续。例如，在文献[DR00, Section 7.4]和文献[CO99]中，以及在www.ietf.org网上都可以找到一些互联网文稿。

文献[DWY99, RM99a, RM99b, Ram01, MM00, Bar00, GR00a, GR00b, Dos99, MBN99, Wu95, WO95, Tel98, GR96, GRS97]为光层保护方案中的主要问题提供了很好的参考。不同层之间的保护方案互通，在文献[Dem99, MB96]中进行了全面的概述。

本章所讨论的电信级以太网保护是ITU-T G.8031 [ITU06]中的线性保护和G.8032 [ITU08]中的环保护。有关环保护及其未来发展的讨论可以参阅文献[RLY+08]。

对 GMPLS 的完整讨论见文献[FB06]。

传送 MPLS (T-MPLS)已经由 ITU 开发。点到点保护是 ITU-T G. 8131[ITU07b]的内容。环保护在 ITU-T G. 8132[ITU07a]中进行了描述，是编制时的草案。为避免 IETF MPLS 技术的兼容性问题，IETF 正在开发传送 MPLS 技术，称为传送多协议标记交换(MPLS-TP)。在文献[YS08]中，有关于环网的 MPLS 快速重路由与 T-MPLS G. 8132 的比较。

网络生存性的完整讨论可以阅读文献[Gro03]，包括类型的讨论、故障的原因及其统计信息。

习题

6.1 考虑两种恢复类型的一个共享保护环。在第一种恢复方案中，当一个故障发生时，通过环中源与宿节点之间的连接来重选路由。在第二种恢复方案中，通过紧邻故障链路的节点之间的连接绕环重选路由(像 BLSR 情形那样)。给出一个流量模型的例子来说明第一种方案比第二种方案使用更少的环带宽。再给出另一个说明这两种方案需要相同的带宽量的例子。

6.2 说明在环结构中如果保护容量小于工作容量，则在某些单故障情况下业务不能恢复。

6.3 当所有流量都在一个枢纽节点与其他节点之间时，比较 UPSR 与 BLSR/2 的性能。假设这两种情况的环速率相同，在这种情况下，BLSR/2 在承载流量容量上比 UPSR 更高效吗?

6.4 构建使 BLSR/4 承载流量容量最大时的一个流量分布。该最大容量是工作光纤比特率的多少倍?

6.5 假设有一均匀的流量分布，计算运行在工作光纤倍数比特率上时的 BLSR/4 承载流量容量。

6.6 考虑如图 6.28 所示的拓扑，其中 STS-1 按照由下表所规定的每一对节点的带宽需求来传送，假设所有带宽需求是双向的。

STS-1	B	C	D	E
A	12	6	4	12
B		8	10	6
C			12	2
D				8

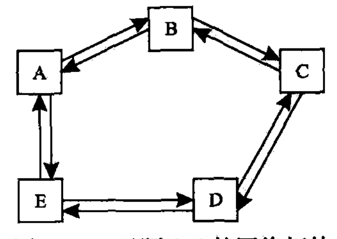


图 6.28 习题 6.6 的网络拓扑

已知光纤拓扑和基于 STS-1 的带宽需求，将利用一个双纤 OC-N SONET 环结构，但是需要确定哪一种 SONET 环结构最适合该已知的网络，是 UPSR，还是 BLSR/2。

(a)给出一个详细图说明在节点 A 与 C 之间的 6 个 STS-1 如何通过 UPSR 和 BLSR/2 来传送? 重画图 6.28，并加以说明。

(b)假设一台反铲挖土机挖断了节点 B 和 C 之间的一对光纤，再重画图 6.28，并参考上面的说明，详细叙述该故障刚发生后节点 A 与 C 之间的 6 个 STS-1 如何通过这 UPSR 和 BLSR/2 来传送。使用虚线来突出与正常状态下任何路由的差别。

(c)使用上表给出的带宽需求，设计该 UPSR 和该 BLSR/2 的最佳环路由方案。说明图 6.28 网络拓扑上的路由。此外，确定这两种情况下每条光纤链路上传送的 STS-1 数量。

(d)假设要使用单个 OC-N 环，对所设计的 UPSR 和 BLSR/2，N 的最低标准值在每种情况下是多少?

(e)对于给出的所有这些信息，哪种环结构更适合这种应用? 简要解释原因。

6.7 UPSR、BLSR/4 和 BLSR/2 主要设计为处理单一故障。但是，它们还可以处理某些同时出现多个故障的情形。详细描述这些不同结构可以处理的多个链路/节点故障组合的类型。

6.8 在 SONET UPSR 中，1+1 保护不能在光纤层上实现，但是能够在单一 SONET 连接层上实现:对于每条连接，接收机选择两条路径中较好的一条路径。另一种更简单的方法是接收机简单地选

择两条光纤输入线路中较好的一条线路，如基于误码率。这种情况下，接收机不必查看单一连接来决定，而需要查看光纤中混合信号的误码率。为什么不这样做呢?

6.9 假设只有两芯光纤，但是每芯光纤上可以使用两个波长，如1.3 μm和1.55 μm。可采用如下3种不同方法来配置一个BLSR/4环:(1)两条工作链路可以复用到一芯光纤上，而两条保护链路可以复用到另一芯光纤上;(2)一条工作链路和一条保护链路可以在相同方向上复用到一芯光纤上;(3)一条工作链路和一条保护链路可以在相反方向上复用到一芯光纤上。你会选择哪种方案?

6.10 考虑采用跨距倒换和环倒换的四纤BLSR。在网络管理中需要何种功能:(a)协调跨距与环倒换机制;(b)能恢复多个故障吗?

6.11 考虑如图6.18所示的例子，详细描述采用该办法可以处理多芯光纤同时中断。

6.12 考虑有1个枢纽节点和4个接入节点的5节点光环形网。所支持的流量是在每个接入节点与枢纽节点之间的一条光路。在本例中，你既可以采用双纤OCh-DPRing，也可以采用双纤OCh-SPRing。网络中不允许使用波长转换，因此，每条光路在沿其路径的每条链路上必须使用相同的波长。比较每种情况所需的保护容量和工作容量。使用一条链路上的一个波长作为一个单位容量。如果波长转换可用于这两种类型的环中任何节点上，则你能回答出有何变化吗?

6.13 开发实现如下功能计算机软件:

(a)允许你能输入网络拓扑图和一组光路(源-宿)。

(b)采用最短路径算法路由这些光路。

(c)分别计算1+1 OCh保护和OCh共享网状保护两种情况下的网络保护带宽。

在1+1 OCh保护下，采用一种算法来为每条光路提供两条不相交的最短路径，如文献[ST84]中那样的光路。在共享网状保护下，采用如下算法:对于每个故障i，确定网络中每条链路l所需的保护容量$C_i(l)$。证明，链路l所需的总保护容量为$\max_i C_i(l)$。

(d)用各种拓扑、流量模式和不同的路由/保护计算算法进行试验。总结一下你的结论。

参考文献

[AJY00] C. Alaettinoglu, V. Jacobson, and H. Yu. Towards millisecond IGP convergence. In *North American Network Operators Group Fall Meeting*, 2000. See also IETF drafts *draft-alaettinoglu-isis-convergence-00.txt* and *draft-ietf-ospf-scalability-00.txt*.

[ATM96] ATM Forum. *Private Network-Network Interface Specification: Version 1.0*, 1996.

[Bar00] S. Baroni et al. Analysis and design of backbone architecture alternatives for IP optical networking. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 18(10):1980–1994, Oct. 2000.

[Bat98] R. Batchellor. Optical layer protection: Benefits and implementation. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 1998.

[CO99] T. M. Chen and T. H. Oh. Reliable services in MPLS. *IEEE Communications Magazine*, 37(12):58–62, Dec. 1999.

[Dem99] P. Demeester et al. Resilience in multilayer networks. *IEEE Communications Magazine*, 37(8):70–77, Aug. 1999.

[Dos99] B. T. Doshi et al. Optical network design and restoration. *Bell Labs Technical Journal*, 4(1):58–84, Jan.–Mar. 1999.

[DR00] B. S. Davie and Y. Rekhter. *MPLS Technology and Applications*. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2000.

[DWY99] P. Demeester, T.-H. Wu, and N. Yoshikai, editors. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Survivable Communication Networks*, volume 37, Aug. 1999.

[FB06] A. Farrel and I. Bryskin. *GMPLS: Architecture and Applications*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 2006.

[GR96] O. Gerstel and R. Ramaswami. Multiwavelength optical network architectures and protection schemes. In *Proceedings of Tirrenia Workshop on Optical Networks*, pages 42–51, 1996.

[GR00a] O. Gerstel and R. Ramaswami. Optical layer survivability—A services perspective. *IEEE Communications Magazine*, 38(3):104–113, March 2000.

[GR00b] O. Gerstel and R. Ramaswami. Optical layer survivability: An implementation perspective. *IEEE JSAC Special Issue on Optical Networks*, 18(10):1885–1899, Oct. 2000.

[Gro03] W. Grover. *Mesh-Based Survivable Transport Networks: Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET and ATM Networking*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.

[GRS97] O. Gerstel, R. Ramaswami, and G. H. Sasaki. Fault tolerant WDM rings with limited wavelength conversion. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 508–516, 1997.

[HYCG00] G. Hjalmtysson, J. Yates, S. Chaudhuri, and A. Greenberg. Smart routers—Simple optics: An architecture for the optical Internet. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 18(12):1880–1891, 2000.

[ITU93] ITU-T. *Recommendation Q.700: Introduction to CCITT Signaling System No. 7*, 1993.

[ITU06] ITU-T. *Recommendation G.8031/Y.1342: Ethernet linear protection switching*, 2006.

[ITU07a] ITU-T. *Liaison Statement G.8132 T-MPLS ring protection*, 2007.

[ITU07b] ITU-T. *Recommendation G.8131: Linear protection switching for transport MPLS (T-MPLS) networks*, 2007.

[ITU08] ITU-T. *Recommendation G.8032/Y.1344: Ethernet ring protection switching*, 2008.

[Kha97] S. Khanna. A polynomial time approximation scheme for the SONET ring loading problem. *Bell Labs Technical Journal*, 2(2):36–41, Spring 1997.

[LC97] C. Y. Lee and S. G. Chang. Balancing loads on SONET rings with integer demand splitting. *Computer Operations Research*, 24(3):221–229, 1997.

[MB96] J. Manchester and P. Bonenfant. Fiber optic network survivability: SONET/optical protection layer interworking. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 907–918, 1996.

[MBN99] J. Manchester, P. Bonenfant, and C. Newton. The evolution of transport network survivability. *IEEE Communications Magazine*, 37(8):44–51, Aug. 1999.

[MM00] G. Mohan and C. S. R. Murthy. Lightpath restoration in WDM optical networks. *IEEE Network Magazine*, 14(6):24–32, Nov.–Dec. 2000.

[Pax97] V. Paxson. End-to-end routing behavior in the Internet. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(5):601–615, Oct. 1997.

[Ram01] R. Ramamurthy et al. Capacity performance of dynamic provisioning in optical networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 19(1):40–48, 2001.

[RLY+08] J.-D. Ryoo, H. Long, Y. Yang, M. Holness, Z. Ahmad, and J. K. Rhee. Ethernet ring protection in carrier ethernet networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(9):136–143, Sept. 2008.

[RM99a] B. Ramamurthy and B. Mukherjee. Survivable WDM mesh networks, Part I—Protection. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 744–751, 1999.

[RM99b] B. Ramamurthy and B. Mukherjee. Survivable WDM mesh networks, Part II—Restoration. In *Proceedings of IEEE International Conference on Communication*, pages 2023–2030, 1999.

[SR97] M. Sexton and A. Reid. *Broadband Networking: ATM, SDH and SONET.* Artech House, Boston, 1997.

[ST84] J. W. Suurballe and R. E. Tarjan. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths. *Networks*, 14:325–336, 1984.

[Tel98] Telcordia Technologies. *Common Generic Requirements for Optical Add-Drop Multiplexers (OADMs) and Optical Terminal Multiplexers (OTMs)*, Dec. 1998. GR-2979-CORE, Issue 2.

[WO95] L. Wuttisittikulkij and M. J. O'Mahony. Multiwavelength self-healing ring transparent networks. In *Proceedings of IEEE Globecom*, pages 45–49, 1995.

[Wu92] T. H. Wu. *Fiber Network Service Survivability*. Artech House, Boston, 1992.

[Wu95] T. H. Wu. Emerging techniques for fiber network survivability. *IEEE Communications Magazine*, 33(2):58–74, Feb. 1995.

[YS08] J. Yang and H. Su. *Multiprotocol Label Switching Transport Profile Ring Protection Analysis*. Internet Engineering Task Force, Oct. 2008. IETF draft, *draft-yang-mpls-tp-ring-protection-analysis-00*.

第7章　WDM网络设计

在以前的章节中，了解到光层为较高层设备如SONET/SDH复用器、IP路由器和以太网交换机等之间提供高速电路交换连接或光路。光层通过光线路终端(OLT)、光分/插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)在物理层光纤上实现这些光路，称利用这样光路的网络为波长路由网络。在这一章中，目标是研究如何设计波长路由网络。这不仅需要学习如何设计光层，而且需要学习如何设计更高层的SONET层或IP网络层，因为这两层的设计是紧密联系在一起的。下面通过举例子来说明。

例7.1　在图7.1(a)中，有3个通过WDM光纤链路连接的标记为A、B和C的节点。为简单起见，假设流量是以IP包的形式由位于这些节点的路由器产生的。如果较高层是由SONET/SDH的复用器组成，则可列出类似的例子。举一个具体例子，假设所有的路由器接口工作在10 Gb/s，这也是WDM链路每个波长的传输容量。现在假如基于IP包的流量估算，所有3对路由器A-B、B-C和A-C之间需要50 Gb/s的传输容量。该网络可以有两种方式来处理这样流量。

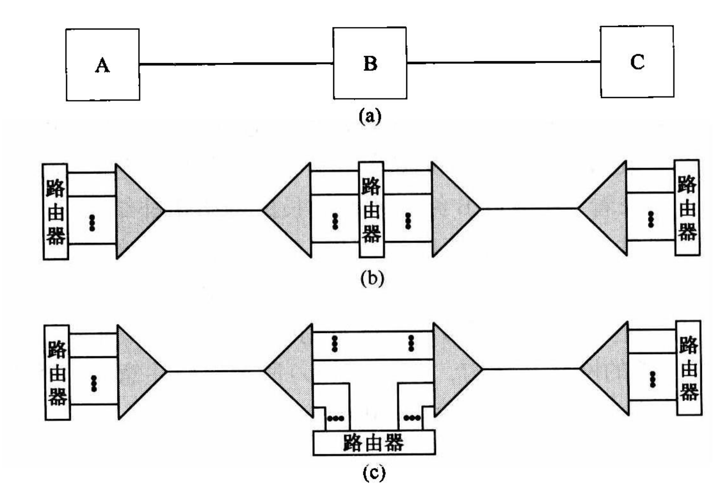


图7.1　(a)一个3节点网络；(b)节点A-B和B-C通过WDM链路连接，所有波长在节点B下路和上路；(c)一半波长在节点B以光形式直通，减少了节点B路由器端口数量

1. **没有光的分/插复用器**：在第一种方法中，在A-B和B-C的每条链路上设立了10个波长，用以连接链路终端的路由器。注意到，A-B链路的流量是50 Gb/s(从A到B的流量) + 50 Gb/s(从A到C流量，它必须通过A-B链路) = 100 Gb/s。同样，B-C链路的流量也是100 Gb/s。这样，A-B链路和B-C链路的每一条链路上的10个波长是足以承载这些流量的。在这种情况下，在节点A使用10个路由器端口，在节点B使用20个路由器端口，在节点C使用10个路由器端口，一共使用40个路由器端口。在光

层，节点 A 和节点 C 都有 OLT 设备，但尽管节点 B 有一对 OLT 设备，但它们不能让所有波长穿越节点 B，如图 7.1(b)所示。

2. **使用光分/插复用器：**在这第二种设计中，在线路 A-B、B-C 和 A-C 的每一条线路上只设置了 5 条光路。A-C 的 5 条光路都在光层穿越节点 B，不需要转换为电信号。与上述没有光的分/插复用器需要 40 个路由器的端口的方法相比，这种设计使得节点 A、B、C 的每个节点只需要 10 个路由器端口，总共 30 路由器端口。然而，这种设计需要节点 B 具有 OADM 节点功能，即具有能在节点 B 路由器终止的 20 个光路中的 10 条光路上路和下路，并允许其他 10 条光路通过的能力。这一点如图 7.1(c)所示。

因此，在使用光分/插复用器的设计中，可以权衡节点 B 中 IP 路由器的端口数(10 和 20)使该节点具有光分插/复用能力。一般情况下，权衡较高层的设备(IP 路由器端口)和光层设备(OADM，或在后面例子中提到的增加的波长数)之间的成本，有关这一点后面还可看到。这两种设计都是非常有效的，用户都会采用。选择哪一种将根据光学和较高层设备之间的成本来权衡。在这个例子中，在节点 B 提供光分插/复用能力需要一套 OADM 设备，用以代替两个 OLT 设备。这样做的成本在现在很多情况下比提供额外的10 Gb/s的 IP 路由器端口更便宜。从长远及从根本上来看，这种情况很可能会占上风，因为让一个波长直通过节点比在 IP 层路由一个波长上传输的所有数据包更为简单。

在同一个例子中，如果节点 B 直通流量为一个波长的一小部分，而又使用了带有光直通的设置，则具有 10 Gb/s 容量的整个波长都必须用做直通流量。同时，不带光直通流量的设置在不增加 IP 路由器端口数量情况下倒可处理这种直通流量。这将使我们更愿意在节点 B 使用 IP 路由器处理直通数据包。这种情况将在下一节的环形网中进一步研究。

从 IP 路由器的角度来看，在节点 B 终止所有波长的网络拓扑结构如图 7.2(a)所示。这是由 IP 层数据包路由算法，如开放最短路径优先(OSPF)协议下的拓扑。这是一种线性拓扑，在节点 A 和节点 B 之间有 10 条并行链路，同时在节点 B 和节点 C 之间也有 10 条并行链路。在有光分插/复用情况下，从 IP 路由器角度看到的网络拓扑结构是 3 对节点的每一对之间由 5 条并行链路全连接的网状网结构，如图 7.2(b)所示。请注意，这两种拓扑结构都能符合 IP 层流量需求，这需要每对路由器之间有 50 Gb/s 容量。

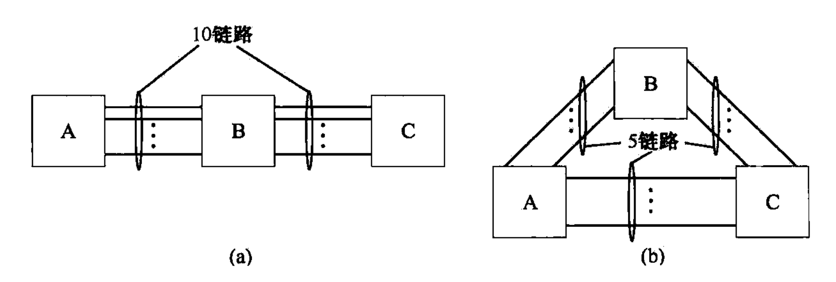


图 7.2 (a)对应于图 7.1(a)，从路由器角度看到的 3 节点网络光路拓扑结构。路由器A-B和B-C之间是由10个并行链路连接的；(b)对应于图7.1(b)，从路由器角度看到的3节点网络光路拓扑结构。对于所有路由器对，A-B、B-C和C-A之间都是由5个并行链路连接的

从 IP 路由器角度或从 SONET/SDH 复用器看到的拓扑结构是由光层提供光路的拓扑结构，因此称之为光路拓扑。它通常也被称为逻辑的或虚拟的拓扑结构，但我们不使用这一术语。同样，建立光路的光纤拓扑结构被称为物理拓扑结构，但我们同样也不使用这一术语。

可以看看设计如下波长路由网络的一般问题。该光纤拓扑结构和流量需求(流量矩阵)是指定的。在例子中，光纤拓扑结构是一个3节点的线性拓扑，每对节点之间的流量需求是 50 Gb/s。其任务是设计连接 IP 路由器的光路拓扑结构，并在光层内实现这种拓扑结构。在例子中，两个满足流量需求的光路拓扑结构如图7.2所示。我们称第一个问题为光路拓扑设计(LTD)问题，称在光层内实现光路拓扑的问题为路由和波长分配(RWA)问题，原因将会很快清楚。在这个例子中，解决 RWA 问题很简单，因为在这个光纤拓扑中每对节点之间只有一条路由。在一般的拓扑结构中，解决 RWA 问题可能相当困难。图7.2中的这两个光路拓扑，其实现见图7.1(b)和(c)。

在设计波长路由网络中面对的另一个问题就是梳理高层的流量。“梳理”一词通常用来指将低速率的 SONET/SDH 的线路(如 STS-1)打包到更高速率的线路(如 STS-48 或STS-192)。这是由数字交叉连接提供的功能。虽然该术语通常不用于 IP 路由器，但在概念上 IP 路由器可以被视为提供了在数据包级的梳理功能。为了获得光直通的好处，较高层的流量必须适当地加以梳理。例如，在图7.1(c)中，预定到节点 B 的所有流量必须要梳理到几个波长，因此只需要这几个波长在节点 B 下路即可。否则，节点 B 不得不将许多个波长下路，这会增加网络营运成本。

在本章的其余部分，将讨论波长路由网络设计的一些细节问题。在7.1节中，将分析环网中较高层和光层的设备成本权衡。然后，将在7.2节中讨论由前面所述3节点网络中引入的 LTD 和 RWA 问题。在7.3节中，将探讨 WDM 链路的容量设计问题，即要确定每一链路上提供波长数的问题。在7.4节中要讨论统计定标方法。在7.5节中，将检查一些已经得到的有关带有和没有波长转换能力的 OXC 之间权衡的研究结果。(将在10.2.6节中讨论实际长途网络设计的例子。)

7.1 权衡:一个详细的环形网例子

在本节中，将研究通过改变光路的拓扑结构用不同方法满足同样流量需求的网络设计中的成本权衡问题。考虑取舍较高层设备和光层设备之间的成本费用。用 IP 路由器端口(或 SONET 线路终端)数来估量较高层设备的成本。所需 IP 路由器的端口数等于所需建立的光路数的两倍，因为每条光路连接了一对 IP 路由器端口。构成光层成本的一个重要部分是 OLT 和 OADM 中所需要的转发器数量。由于每条光路需要一对转发器，因此分摊了转发器与较高层设备的费用。这也包括转发器预置在较高层设备中的情况(见图4.2)。还通过链路中使用的波长数估量了光层设备费用的其余部分。

网络拓扑结构通常设计为双连接的，也就是说，在网络的每对节点之间有2条不相交路由。而任意的光纤网状拓扑，除了双连接外，在大型网络中还有比光纤环形拓扑更经济有效的连接。环形网已被广泛应用，对一个有限地理分布的网络来说，它是一种很好的网络。基于这个原因，本节中将考虑光纤环形拓扑结构。环形网之所以得到广泛应用，在某种程度上

是因为对一个双连接的网络来说，N 个节点的环形连接有一个最小的潜在链路数(只是 N)，因此往往有低的光纤应用成本。

考虑一个流量矩阵，其中 t 个单位流量需要从网络中某一 IP 路由器路由到其他所有的 IP 路由器。用 N 代表网络中的节点数，并假设流量是均匀的，即每对 IP 路由器之间的流量是$t/(N-1)$。为归一化起见，假定 1 个波长的容量为 1 个单位。正如上述 3 节点线性拓扑情况那样，将网络设计问题分成两部分：LTD 问题和 RWA 问题。将讨论 3 种不同的光路拓扑结构，所有这些拓扑结构都能满足流量需求。这些拓扑结构的一般形式如图 7.3 所示。

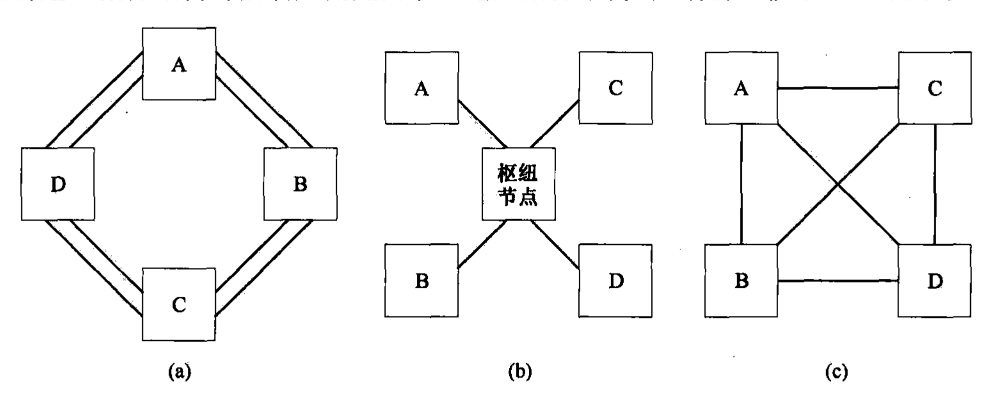


图 7.3 可用于光纤环形拓扑的 3 种不同的光路拓扑。(a)点至点的 WDM 环形结构，环形网中相邻路由器由1条或多条光路连接；(b)枢纽节点拓扑结构，所有的路由器都由光路连接到中心路由器（枢纽节点）；(c)全连通网状结构，每个路由器都由光路连接到所有其他路由器

如图 7.3(a)所示的第一个光路拓扑结构是一个环，称为一个点至点波分复用(PWDM)环。在这种情况下，光路拓扑也是一个环，就像光纤的拓扑结构，但可以在环形网相邻节点之间有多条光路为 IP 路由器之间提供所需的容量。

如图 7.3(b)所示的第二个光路拓扑是一种枢纽节点设计。所有的路由器都通过一条或多条光路连接到中心(枢纽节点)路由器。因此，所有的数据包都行经两条光路：从源路由器到中心路由器，再从中心路由器到宿路由器。

第三个，也是最后一个光路拓扑结构如图 7.3(c)所示，是一个全光设计。在这种情况下，在所有每对路由器之间都建立了直接的光路。因此，数据包从源路由器到宿路由器之间只行经一条光路。

接下来考虑如何在光纤网上实现这些光路拓扑结构，即要解决这三种设计中的 RWA 问题。RWA 问题就是要为每条光路找到路由，并对该路由上的每一链路指派一个波长。假设一条光路在它所行经的所有链接上必须分配相同的波长，即光层不提供任何波长转换能力。此外，没有两条光路在穿越同一链路时可以分配相同的波长。

例 7.2 首先考虑 PWDM 环行网。图 7.4 所示的网络是一个 PWDM 环行网。每个节点接收所有的波长并发送到 IP 路由器。对于这种网络，环中相邻节点之间的所有光路都是“单跳”的。如果 W 表示每一链接的波长数，那么可以在每对相邻节点之间建立 W 条光路。

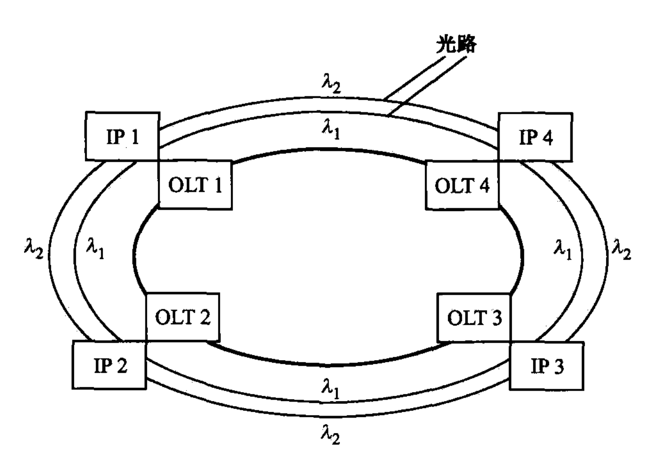


图 7.4 一个 PWDM 环形网结构。对应于 $t=3$，光路及其波长分配如图所示

所需 IP 路由器，端口数将由用于路由流量的算法决定。假设在源和宿之间沿最短路径路由每路信息流，N 为网络中的节点数量。假设 N 是偶数，则可以计算出每条链路上的流量负载（以光路为单位）为

$$L=\frac{N+1+\frac{1}{N-1}}{8}t \tag{7.1}$$

在这种情况下，因为所有的光路是单跳光路，因此支持该流量所需的波长数简单为

$$W=\lceil L\rceil=\left\lceil\frac{N+1+\frac{1}{N-1}}{8}t\right\rceil \tag{7.2}$$

由于每个节点都接收和转发所有的波长，每节点所需路由器的端口数 Q 等于

$$Q=2W \tag{7.3}$$

这个例子表明，在确定网络建设成本中需要考虑下列一套设计参数。

路由器端口。显然，想用可能最少的 IP 路由器端口支持已给定的流量。请注意，因为光路是建立在两个路由器端口之间的，最少的端口数与用于支持流量必须设置的最少的光路数是一样的。

波长。与此同时，也想使用尽可能少的波长数，因为使用波长多了将在光层导致额外的设备成本。

跳数。这个参数指的是一条光路中所采取的最大跳数。对于 PWDM 环网，每条光路正好采用一跳。这个参数非常重要，因为随着跳数的增加，传输系统设计变得越来越困难，这会再次增加光层设备的成本。

一般来说，会在这些不同的参数之间进行折中。例如，将会在 PWDM 环网中使用大量路由器端口，但尽可能使用最少的波长。在下面枢纽节点和全光设计实例中，在需要更多波长的代价下，将使用较少的路由器端口。

例 7.3 本例中将考虑如图 7.5 所示的枢纽节点网络结构。一个附加的枢纽路由器添加到该环网中。所有波长上的数据包都由枢纽路由器接收并再给予适当路由。这与 PWDM 环网的节点是完全相同的。其他 N 个节点是比较简单的节点，只有足够的路由器输出端口去发

送和接收到达该节点的流量。(为了使例子简单，假设枢纽路由器本身不发送和接收任何流量。当然，在实际中并不是这种情况。事实上，对网络其余部分来说，枢纽节点可以作为一个网关节点。)在每个节点和枢纽节点 h 之间建立光路。从一个非枢纽节点 i 到另一个非枢纽节点 j 的流量沿两条光路路由，一条从 i 到 h，另一条从 h 到 j。为了支持这些流量，将对每个节点到枢纽节点设立$\lceil t\rceil$条光路。因此，对于该种配置的网络，每个节点所需路由器的端口数量为

$$Q = 2\lceil t\rceil \tag{7.4}$$

假设光路的路由和波长分配方法如下：两个相邻的节点沿环网利用不同的路径和重复使用同一序列的波长，如图7.5所示。对于这种RWA算法，所需的波长数可以计算出

$$W = \frac{N}{2}\lceil t\rceil \tag{7.5}$$

最坏情况下的跳数是

$$H = N - 1 \tag{7.6}$$

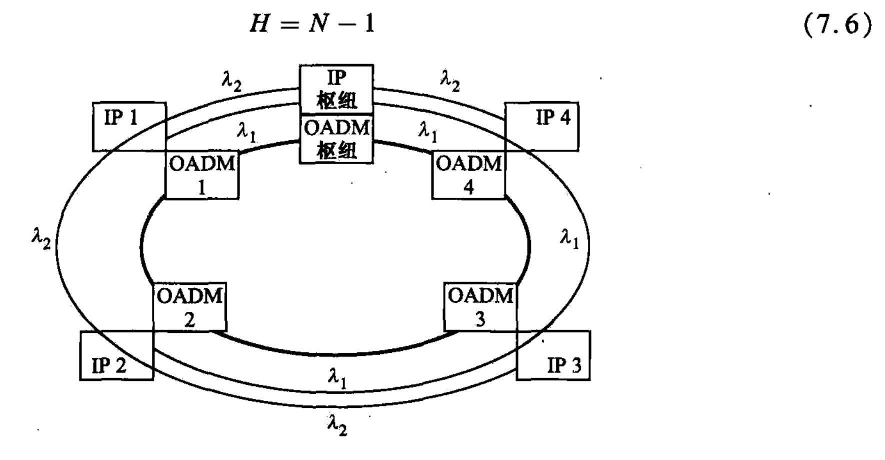


图7.5 一种枢纽WDM环形网结构。在$\lceil t\rceil=1$情况下，光路及其波长分配如图所示

例7.4 最后一个例子是如图7.6所示的全光设计，其中数据是在源节点和宿节点之间沿着单一光路传输，从不通过任何中间路由器中途发送数据。在这种情况下，必须在每一对节点之间建立$\lceil t/(N-1)\rceil$条光路，以处理每对节点之间的 $t/(N-1)$ 单位流量。每个节点所需路由器的端口数因此为

$$Q = (N-1)\left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \tag{7.7}$$

波长的数量将取决于光路如何路由和分配波长(见习题7.5)。有可能获得合适的路由和如下式的波长分配数(当 N 是偶数时)，

$$W = \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \left(\frac{N^2}{8} + \frac{N}{4}\right) \tag{7.8}$$

为了理解前三个例子的网络设计特点，对任一种设计就它们所需的端口数和波长数比较一下它们的一些简单下限。显然，对任何设计都要求 $Q\geqslant\lceil t\rceil$。下面推导所需波长数的下限。设 h_{ij}表示网络中节点 i 和节点 j 之间的最小跳数。定义节点之间的最小平均跳数是

$$H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} h_{ij}}{N(N-1)}$$

对于环形网络，可以推导出 H_{min}（N 为偶数）公式如下：

$$H_{\min} = \frac{N+1}{4} + \frac{1}{4(N-1)} \tag{7.9}$$

请注意，任何链路的最大的流量负载比平均流量负载都大，这是由方程给出的

$$\begin{aligned} L \geqslant L_{\text{avg}} &= \frac{H_{\min} \times \text{总流量}}{\text{链路数}} = \frac{H_{\min} \times \frac{1}{2}Nt}{N} \\ &= \left(\frac{N+1}{8} + \frac{1}{8(N-1)}\right)t \end{aligned} \tag{7.10}$$

显然，我们需要的波长数为 $W \geqslant L$。

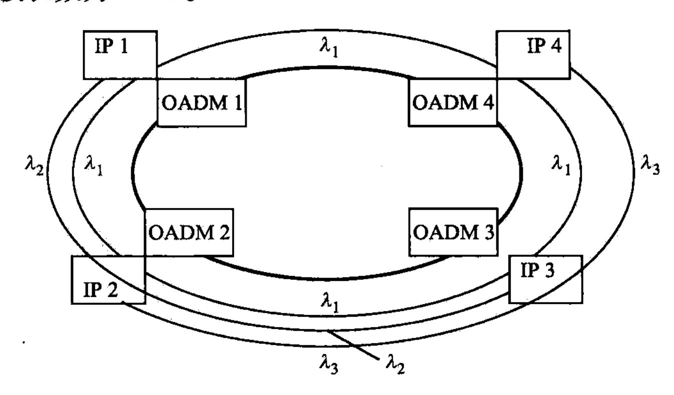


图 7.6　一种全光、4 节点网络配置图。在 $t = 3$ 情况下，光路及其波长分配如图所示

图 7.7 中绘出了这三种不同设计所需路由器的端口数和在有 8 个节点的网络中的下限。可以看到，在流量小时，枢纽节点网络所需路由器的端口数最少。PWDM 设计所需路由器的端口数最多。这清楚地表明，相对于仅有点至点 WDM 的链路来说，光层内路由信号的价值。

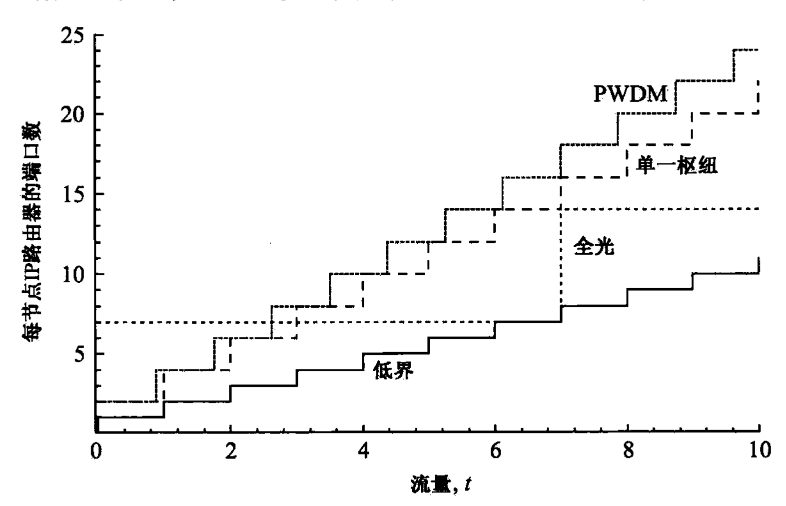


图 7.7　在 $N = 8$ 节点的环形网中，对应于例 7.2 ~ 例 7.4 的不同设计方法所需IP路由器的端口数。该图也同时显示了 $\lceil t \rceil$ 的下限值

遗憾的是，为了减少了路由器的端口，需要大量波长数为代价来支持同样的流量负载。图7.8中绘出了三种不同的设计中所需的波长数以及前面推导出的下限。PWDM环形网使用的波长数最少，它达到了下限，从这个角度来看，可能这种设计是最好的一种。在支持同样的流量负载情况下，枢纽结构使用了比较多的波长数。

如果t略小于或等于$N-1$(或$N-1$的几倍)，则全光设计是一种好的设计。这是因为，在这些情况下，每对节点之间需要整数条光路，最好的设计就是在一对节点中有专用光路而不需要在中间节点中止任何流量。这引出了一个重要的观点：如果用$m+t'$表示一对节点之间的流量，其中m是一个非负整数，并且$0\leqslant t'<1$。那么最好的解决方案是在该对节点之间设置m条光路来路由m单位流量，以及用其他一些方法(如枢纽或PWDM架构)来处理其余的t'单位流量。如果t'接近于一个单位，那么最好的解决办法是它们之间能有另一条直接的光路。

整体而言，在光层提供联网功能(波长路由和交换)有可能明显节省较高层(IP或SO-NET)设备的成本。

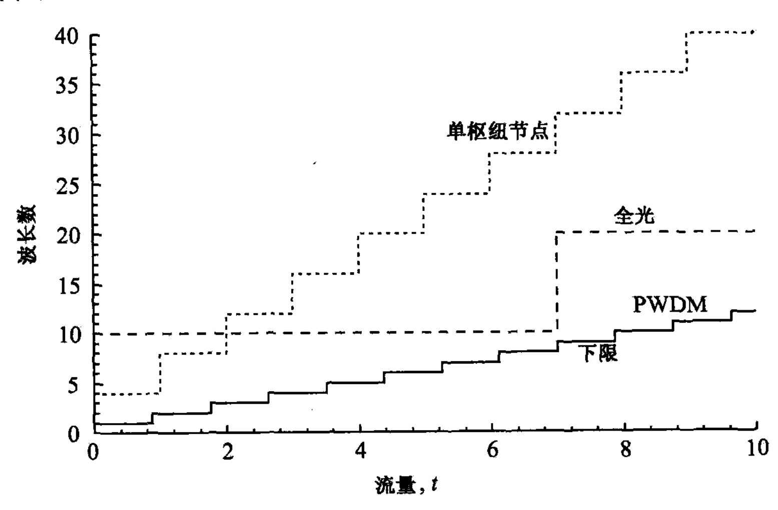


图7.8 在$N=8$节点的环形网中，对应于例7.2～例7.4的不同设计方法所需的波长数。该图也同时显示了式(7.10)的下限

7.2 光路拓扑设计和路由与波长分配问题

将波长路由网络设计问题分为光路拓扑设计(LTD)问题和路由与波长分配(RWA)问题，其一般处理方法对于实际问题是一个很好的探索，因为将这两个问题综合在一起求解是相当难的。在前述3节点线性网和环形网中，已经采用了这种处理方法。在这两个例子中，将考虑几种不同的光路拓扑，并对它们每一种都检验了RWA问题。这就使不同设计中的成本权衡问题明晰了。实际中，每一条光路拓扑连同其在光层实现(RWA问题的解决方案)一起将得到纯的、真正的成本(货币)。然后，可以挑选出成本最低的设计。在第10章中，将会讨论这样一个例子。现在更详细地来探讨LTD和RWA这两部分问题。

7.2.1 光路拓扑设计

现在考虑一个具体的、比较简化的光路拓扑设计问题，并研究如何可以得到解决的方法。假设底层光纤拓扑或光层没有施加任何限制。(这种限制的例子是对光路长度和穿越一条链路的光路数量加以限制。)

假设所有光路都是双向的(见 7.2.2 节)，也就是说，如果用一条从节点 i 到节点 j 的光路，那么也要使用一条从节点 j 到节点 i 的光路。这是在实际中最常见的情况，因为几乎所有的高层协议，包括 IP 和 SONET，都采取双向的物理层链路。

一种约束是，在每个节点用一个最多有 Δ 个端口的 IP 路由器与其他 IP 路由器连接。(另外，每个路由器有本地接口连接到以太网交换器等。)这限制了每个路由器端口的最大数量为 Δ，从而间接地制约了 IP 路由器的成本。这也限制了网络中的光路数为 $n\Delta$，其中 n 为网络中的节点数目，因为每一条光路的起点和终点都是 IP 路由器的端口。如果假设每一条光路的成本是一样的，不管它的终点在哪里，那么这种约束相当于限制了光路成本。这种假设不适用于广域环境，估计广域环境中较长的光路会比较短的光路费用高。但是，它可能适合于区域网络。(许多电话公司都在本区域内对所有呼叫提供单一费率，因此不难想象在一个区域内所有光路费用可能相同。)做这种假设的主要原因当然是为了简化问题。

当设计光路的拓扑时，还必须解决数据包在光路拓扑中的路由(或连接)问题。这是因为一个给定的(光路)拓扑是否支持流量需求不仅依赖于拓扑本身结构，而且依赖于所使用的路由算法。

为了用数学术语确切地阐述问题，需要引入若干定义。假定 IP 数据包流量的统计模型为：源-宿(s-d)节点对(s, d)数据包的到达率是λ^{sd}(以数据包/秒为单位)，其中 $s, d = 1, \cdots, n$。该问题在每对节点(i 和j)间存在一个变量 b_{ij}，$i, j = 1, \cdots, n$，$i \neq j$。变量 b_{ij}是二进制值(0 或 1)，其中如果所设计的光路拓扑结构存在从节点 i 到节点 j 的光路，则$b_{ij} = 1$，否则，$b_{ij} = 0$。光路作为一条链路从节点 i 承载流量到节点j。光路拓扑设计问题的解将指定 b_{ij}值，而反过来又指定了将这些光路连接的节点对。假设可以任意分割同样一对节点间经过不同的路径穿越网络的流量。如果流量由 IP 数据包组成，则这不是一个问题；但是如果考虑的是 SONET 电路交换，则这等于假设节点间的流量包含了大量这样的电路交换数据。当正在设计一个骨干网络以支持大量私人租用线路(如多条 T1 或 T3)时，这个假设是可以得到满足的。

设 s-d 节点对(s, d)间经过链路(i, j)(如果存在的话)路由的部分流量是 a_{ij}^{sd}，则 $\lambda_{ij}^{sd} = a_{ij}^{sd}\lambda^{sd}$是 s-d 节点对$(s, d)$之间的经过链路$(i, j)$路由的流量(分组包/秒)。经过链路$(i, j)$路由的所有的 s-d 节点对的总流量是 $\lambda_{ij} = \Sigma_{sd}\lambda_{ij}^{sd}$。定义阻塞参数 $\lambda_{max} = \max_{ij}\lambda_{ij}$。请注意，$\lambda_{ij}^{sd}$(以及 λ_{ij}和 λ_{max})都是必须要求解的变量。确定它们的值相当于寻找一种路由算法。

为了理解为什么阻塞是一个重要参数，考虑一下这种情况：分组包到达遵循泊松过程和分组包传输时间是平均时间为 $1/\mu$ 秒的指数分布。做标准假设如下：提供给网络中一条链路(光路)的流量与其他链路的流量无关，每一条链路可以按 M/M/1 排队建模。链路(i, j)的平均排队延迟由下式给出[BG92, Section 3.6.1]。

$$d_{ij} = \frac{1}{\mu - \lambda_{ij}} \tag{7.11}$$

吞吐量可以定义为提供负载的最小值，对于这样的负载，任何链路的延迟变成无限大。这发生在 $\lambda_{max} = \max_{i,j} \lambda_{ij} = \mu$ 时。因此，性能目标将是尽量使阻塞 λ_{max} 值最小。

现在准备正式说明该问题的数学规划。

目标函数

$$\min \lambda_{max}$$

的条件为

每个节点流量守恒：

$$\Sigma_j \lambda_{ij}^{sd} - \Sigma_j \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} \lambda^{sd} & 若 s = i \\ -\lambda^{sd} & 若 d = i \\ 0 & 其他 \end{cases} \quad (对所有的 s、d、i 成立)$$

在一条逻辑链路上总流量：

$$\lambda_{ij} = \Sigma_{s,d} \lambda_{ij}^{sd} \quad 对所有的 i、j 成立$$

$$\lambda_{ij} \leqslant \lambda_{max} \quad 对所有的 i、j 成立$$

$$\lambda_{ij}^{sd} \leqslant b_{ij} \lambda^{sd} \quad 对所有的 i、j、s、d 成立$$

连接度约束条件：

$$\Sigma_i b_{ij} \leqslant \Delta \quad 对所有的 j 成立$$

$$\Sigma_j b_{ij} \leqslant \Delta \quad 对所有的 i 成立$$

双向光路约束：

$$b_{ij} = b_{ji} \quad 对所有的 i、j 成立$$

非负和整数约束：

$$\lambda_{ij}^{sd}, \lambda_{ij}, \lambda_{max} \geqslant 0 \quad 对所有的 i、j、s、d 成立$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\} \quad 对所有的 i、j 成立$$

识别带有信息流的在每一 s-d 对节点间路由的分组包。该网络中，节点 i 的流量守恒公式左侧是一组信息流(sd)流出节点 i 的净流量。净流量是输出流量与输入流量之间的差。如果对该组信息流来说，这个节点既不是源节点，也不是宿节点($i \neq s, d$)，则右边是0。如果节点 i 是信息流的源节点($i = s$)，则净流量等于这些分组包的到达率 λ^{sd}；如果节点 i 是宿节点 $i = d$，则净流量等于 $-\lambda^{sd}$。

约束 $\lambda_{ij} = \Sigma_{s,d} \lambda_{ij}^{sd}$ 只是 λ_{ij} 的定义。约束 $\lambda_{ij} \leqslant \lambda_{max}$，连同正在最小化 λ_{max} 一起，可以确保 λ_{max} 最小值是阻塞值。约束 $\lambda_{ij}^{sd} \leqslant b_{ij} \lambda^{sd}$ 确保在 $b_{ij} = 0$ 时对所有的 s 和 d 值 $\lambda_{ij}^{sd} = 0$。因此如果链路(i, j)在拓扑中不存在，没有任何数据包能够在该链路上路由。如果在拓扑中存在这样一条链路(i, j)(即 $b_{ij} = 1$)，这条约束只是简单表述了 $\lambda_{ij}^{sd} \leqslant \lambda^{sd}$ 总是成立，因此在这种情况下它对 λ_{ij}^{sd} 值没有加以任何约束。

连接度约束条件保证了所设计的拓扑结构中进出每个节点的链路不多于 Δ 条。双向光路约束条件 $b_{ij} = b_{ji}$ 确保所设计的拓扑结构只有双向光路，也就是说，如果有一条从节点 i 到节点 j 的光路，也就有一条从节点 j 到节点 i 的光路。约束条件 $b_{ij} \in \{0, 1\}$ 限制了 b_{ij} 的值只可能取 0 或 1。正如很快就会看到的那样，要不是这些制约因素，问题都容易解决！请注意，目标函数和约束条件都是变量 λ_{ij}^{sd}、λ_{ij}、λ_{max}、b_{ij} 的线性函数。具有此属性的数学规划称为线性规划(LP)，此外所有变量都是实数。如果限制所有的变量都只能取整数值，则就是所谓的

整数线性规划(ILP)。在此情况下，一些变量(如 b_{ij})被限制为整数值，因此其方案是一个混合整数线性规划(MILP)的例子，称之为混合整数线性规划光路拓扑设计(LTD-MILP)。虽然已知有许多高效的算法可以解决非常大的线性规划问题，但还不知有何种有效的算法可解决任意整数线性规划(ILP)和混合整数线性规划(MILP)问题。事实上，一般的 ILP 或 MILP 问题是一个 NP-hard 问题(NP-难题)[GJ79]的例子。商业软件包可以求解 LP、ILP 和 MILP 问题。在许多情况下，这些是较大的数学和/或优化程序软件包的一部分。

即使使用这样的软件包，计算整数线性规划和混合整数线性规划方面的问题也非常耗费时间，除非解决一些小规模方面的问题。因此，许多启发式算法被开发出来，以求能找到解决这些问题的近似解。但这些近似方法往往基于一些需要处理问题的具体特点。下面描述一种针对这个问题的启发式算法。启发式方法利用了线性规划(LP)，很容易求解这样一个事实，并采用线性规划松弛法和取整法(LP-relaxation and rounding)的技术得到一个混合整数线性规划光路拓扑设计(LTD-MILP)的近似解。在描述这个方法之前，需要定义数学规划中使用的一些术语。

数学规划可行解(feasible solution of a mathematical program)是任何一组满足所有约束的变量值。数学规划的一个最佳解或简单解是将目标函数优化(视情况而定最小化或最大化)的一个可行解。数学规划的值就是用任何优化解得到的目标函数的值。

注意，如果用约束条件 $0 \leqslant b_{ij} \leqslant 1$ 取代约束件 $b_{ij} \in \{0, 1\}$，则混合整数线性规划光路拓扑设计(LTD-MILP)问题简化为 LP 问题，称之为线性规划光路拓扑设计(LTD-LP)问题。此外，混合整数线性规划光路拓扑设计(LTD-MILP)问题的任一可行的解决方案也是线性规划光路拓扑设计(LTD-LP)问题的可行的解决方案，但线性规划光路拓扑设计(LTD-LP)问题可能有(并且通常会有)其他可行的解决方案。如果一些 LTD-LP 的优化解恰好也是 LTD-MILP 问题的可行的解决方案(即 b_{ij} 等于 0 或 1 时)，则 LTD-MILP 和 LTD-LP 的值将是相等的。否则，LTD-LP 的值将是 LTD-MILP 值的下界。(这是最小化问题的情况。)我们称这个下界为 LP 松弛方法边界(LP-relaxation bound)。

请注意，如果 b_{ij} 值固定等于 0 或 1，这时连接度约束是满足的，混合整数线性规划光路拓扑设计(LTD-MILP)问题再次简化为线性规划(LP)问题。确定了 b_{ij} 值就确定了光路拓扑，剩下的问题是通过这个光路拓扑来路由数据包，以尽量减少阻塞。因此，称以这种方式得到的线性规划(LP)为路由线性规划(routing-LP)。任何路由线性规划的值是 LTD-MILP 值的上界。如果灵巧(或幸运)地确定了 b_{ij} 值，以至于满足连接度约束条件，这将是一个很好的上界。有关如何确定 b_{ij} 的值，必须再次转向 LTD-LP 问题。

考虑任一 LTD-LP 问题的最优解。直观地说，期望接近于 1(或接近于 0)的 b_{ij} 值必须在 LTD-MILP 问题中等于 1(或等于 0)。因此，可以尝试用启发式方法由 LTD-LP 中 b_{ij} 值来确定 LTD-MILP 中的 b_{ij} 值：将 LTD-LP 中的 b_{ij} 值取最接近的整数。但是，必须小心不要违反有关连接度约束。因此，将修改这种取整方法，使其包含在下述的取整算法中。

算法 7.1

1. 用降序方法排列在 LTD-LP 最优解中得到的 b_{ij} 值。
2. 如果不违反连接度约束，从列表的顶部开始设定每个 $b_{ij} = 1$，否则，设置 $b_{ij} = 0$。
3. 当所有的连接度约束都满足或所有的 b_{ij} 都已计算过时，停止计算。

如果用取整算法(rounding algorithm)和求解路由线性规划(routing-LP)得到的线性规划松弛法(LP-relaxation)的下界和上界相互接近，则有一个好的 MILP 方法的近似值。然后，可以用取整算法和路由线性规划得到的拓扑结构和路由算法作为最佳拓扑结构和路由算法的近似。这种方法的一种修改后的版本已在文献[RS96，Jai96]中近乎准确地解决了几个 LTD-MILP 的例子。表7.1表明了在一个这样的例子中的阻塞作为连接度的函数，该例是一个给定取样流量矩阵的14个节点的网络 [RS96]。与在文献[RS96，Jai96]中考虑单向光路的研究工作相比，在此研究中已经考虑双向光路。在这种情况下，对光路拓扑附加了一种约束(双向光路约束)，因此导致阻塞值稍高一些。表7.1中的3列分别对应于 LP 松弛法下界值、求解 MILP 所得精确值和通过取整算法所得到的值。请注意，取整算法所得值非常接近于最佳值，实际上，随着连接度的增加而达到了最优值。

表7.1 在[RS96]给定流量模型下，14个节点示例网络中具有双向光路的光路拓扑的阻塞与节点连接度的关系表。本例中可以看到LP取整算法产生了很好的效果

连接度	LP松弛法	MILP	LP取整法
2	284.67	388.59	440.20
3	189.78	189.78	194.56
4	142.33	142.33	142.33
5	113.87	113.87	113.87
6	94.89	94.89	94.89

已经讨论了光路拓扑设计问题，在给定的流量矩阵 λ^{sd} 和一些约束条件下，以降低任何光路上最大数据包的流量。在 LTD 问题中，流量矩阵通常用于源节点和宿节点之间端到端传输的流量平均比特率。它们常用于预测网络必须支持的未来的流量，考虑到预测中的误差，这一预测值可能包括额外的带宽。LTD 问题中的目标通常是为了降低网络成本，其中可能包括带宽、端口、开关、放大器和再生器的费用。这些费用可引入 LIP 或 MILP 网络设计规划。习题7.9就是一个例子。

果不其然，网络设计问题已经研究多年[Ker93，Cah98]，并成为众所周知的难题。在许多情况下，即使明确地叙述这些问题都变得很困难，因为有许多参数需要优化，许多约束需要处理。虽然已阐明了一种启发式方法来求解这样的整数线性规划问题，但还有其他一些技术可以解决这些问题，请参阅文献[CMLF00，KS98，MBRM96，BG95，ZA95，JBM95，GW94，CGK93，LA91]。

一个实际的必须从 WDM 网络实现的光路拓扑的重要例子是 SONET 环网。SONET 环网有两种类型：单向路径交换环网(UPSR)和双向线路交换环网(BLSR)。在第6章已讨论过这些环网。SONET 环网(光路)和波分复用层的联合设计问题是尽量降低 SONET ADM 的成本，在文献[GLS99]中进行了讨论。

在早期考虑的流量模型中，只使用一个流量矩阵，其值用 λ^{sd} 表示。实际中的流量可以随时间变化，因此改变光路的拓扑结构可能更好一些，并能降低网络成本。由于光路拓扑的变化可能有一定的破坏性，因此必须只能偶尔采用，一次只增加和取消几条光路。随着流量变化的步骤，逐渐改变光路拓扑的一种迭代重构算法在文献[NTM00]进行了讨论。

7.2.2 路由与波长分配

在7.1节中，看到了整体设计问题涉及光层设备(基本上是波长数量)和更高层的设备(如IP路由器端口或SONET线路终端)之间的权衡。在上一节中，研究了LTD问题。现在将研究路由和波长分配(RWA)问题，下面将给出其定义。如果给定网络的拓扑结构和端到端的光路请求(例如，这些请求可以通过求解LTD问题得到)，在所用波长数量最少的条件下确定这些请求所需的路由和波长。

RWA问题可归结为ILP问题，但ILP问题除了只有少数节点的网络外，可能需要解决的问题太多。可以将RWA问题分为两个问题加以简化，就是光路路由问题(LR)和波长分配(WA)问题。LR问题就是为一组光路找出路由，也许它就是一个LTD问题的解。LR问题的目标是在所有光纤链路中，将使用一条光纤链路的光路数目的最大值尽量降低。LR问题的一种替代的目标是尽量减少一些成本，如带宽、端口、开关，或再生器等网络的成本。WA的问题是在给定一些光路和它们的路由情况下为光路分配波长。其目标是对所有光纤链路尽量减少在每光纤链路中使用的最大波长数。

解决LR问题的一个简单方法是按某种顺序路由光路，每次一条光路。路由可以根据网络拓扑结构用最短路径路由算法计算，如文献[Dij59]所述。网络拓扑可以分配给每一条链路不同的权重，因此最短的路径就是权重最小的路径。链路权重的选择应使所产生的光路路由满足LR问题的目标。一个选择链路权重的简单例子是让所有链路权重都等于1，则跳数最少的路由能最大限度地降低链路使用。另一个例子是让链路权重等于$1+L$，其中L是到目前为止流经该链路路由的光路数量。该方法将在路由光路中避免高度使用一些链路。这将均衡所有链路中的光路数量，最大限度地减少每一链路上所需波长的数量。

对于WA问题必须遵守下列约束：

1. 两条光路绝不能在同一链路上分配相同的波长。
2. 如果通过某一开关时没有波长转换，则沿着这个开关的链路上的光路必须分配相同的波长。如果网络中没有波长转换，则光路路由沿线必须赋予相同的波长。

如果没有波长转换，则需要WA算法来分配波长。一个简单而有效的算法是首次适应算法(first fit)。假定波长被编号(例如，0，1，…)，它首先选择可用的最小编号波长。即先将低编号的波长赋予光路，然后将较高的编号的波长留给赋予后来的光路使用。

当网络出现故障时，RWA问题的另一个考虑因素是网络生存性。如第6章所述，可以采用一些方法，如1+1、1:1和共享保护等方法保障光路不受故障影响。其次，光路有工作和备用两条路径。一条光路的工作路径和备用路径应是两条不重合的路径，可避免它们一起失效。通常假定单纤链路故障和单一节点故障是最有可能发生的故障。因此，当计算路径时，会考虑这一情况。一般情况下，多条光纤链路也可能会同时出现故障，这被称为共享风险链路组(SRLG)。一个节点故障导致了一个SRLG，这是因为它导致所有与它相连的链路失效。另一个SRLG的情况是共享一条管道的一组光纤链路。如果管道被切断，则所有光纤链路可能会中断。

为了在单芯光纤中断后网络继续运行，工作和保护路径必须有不相交的链路。同样，为了在一个节点出故障后网络继续运行，工作和保护路径避免通过公共的中间节点，以及形成

SRLG 后网络继续运行，所有路径必须避免穿越一个共同的 SRLG。

有两种常用的方法计算不相交的链路路径。第一种方法只是计算路径时，每次计算一条。第一条路径是最短路径，而第二条路径是另外一条最短的路径，但是避免了第一条路径中的链路的路径。在图 7.9 中 4 节点网络的情况下，这是行不通的。这种计算不相交的路径方法可以直截了当地推广到单节点故障和 SRLG 中。特别是，第二条路径避免第一条路径经过的所有节点和 SRLG。

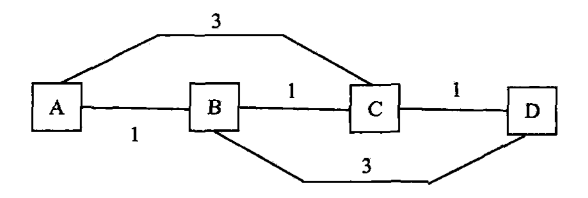


图 7.9　表明带权重链路的网络拓扑结构。在节点 A 和 D 之间有两条链路不相交的路径：(A,C,D)和(A,B,D)。然而用简单方法计算不相交路径失败了。这种方法首先计算出最短路径(A,B,C,D)，但不能找到与第一条路径不相交的第二条路径

第二种方法是与求解最少不相交路径问题的算法一起计算不相交路径。最少不相交路径问题假设链路都被加权，并找出最小总加权的不相交路径。这种方法比较复杂，但可以扩展到处理单节点故障和存在某些 SRLG 的情况。

保护路径所需的带宽取决于保护机制。在采用 1 +1 和 1∶1 保护的情况下，保护带宽是专用的。其次，一条保护路径在它的每条链路上将拥有专用波长。在共享保护的情况下，如果一对光路的工作路径不会同时出故障，则它们的保护带宽可以共享。当分配波长给工作路径和保护路径时，应当考虑到这些情况。

在本章其余部分，假设网络及光路都是双向的。于是，网络中一条光纤链路包括两个相反方向的单向光纤。从运行角度来看，大多数光路是全双工的，因为它们载荷的高层的信息流(例如，SONET 的信息流)是全双工的。此外，网络运营商为操作简便宁愿在两个方向采用相同的路由和波长。但是请注意，在某些情况下，如果在光路不同的方向分配不同的波长有可能减少所需的波长数目。对该问题处理见习题 7.22。

路由和波长的问题也可以在光纤链路、光路或两者都是单向传输的范围内加以研究。相当数量的理论工作已经致力于解决定向边缘和定向光路网络中的路由和波长分配问题。(读者可以在本章的参考文献中找到相关文章。)

7.2.3 波长转换

在第 4 章中已经讨论了波长转换，特别是参照 OXC 节点的波长转换。这种波长转换被称为全波长转换，具有全波长转换能力的节点可以将输入光路的波长转换为任一输出波长。如图 4.11(a) ~ (c)所示的交叉连接节点具有全波长转换能力，而图 4.11(d)和图 4.14 所示的交叉连接节点不具有波长转换能力。

另外两种波长转换是固定波长转换和有限波长转换。在固定波长转换中，以一特定波长 λ_i 输入节点的光路总是在给定波长 λ_j 下从该节点输出。输入和输出波长之间的映射在网络设计时就是固定的，不能够改变。图 7.10 中显示了这种波长变换的实现方法。在有限波长转换中，允许信号从一个波长转换为其他波长的有限子集。例如，可能会允许信号从一个波长

转换到其他两个预定的波长。图 7.11 显示了这种有限波长转换实现方法，其中每个输入波长可以转化为其他两个波长之一。在这种情况下，认为该节点提供的有限转换度为 2。在 7.5 节可以看到，网络中少量的波长转换可以与网络中每个节点都有全波长转换具有几乎相同的好处。

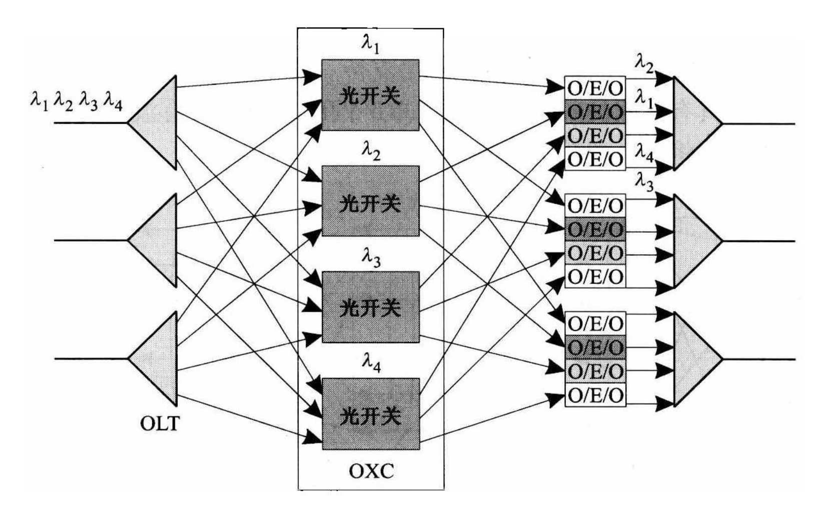


图 7.10　一个是具有固定波长转换能力的节点。以波长 λ_1 输入的信号被转换为 λ_2，反之亦然。以波长 λ_3 输入的信号被转换为 λ_4，反之亦然

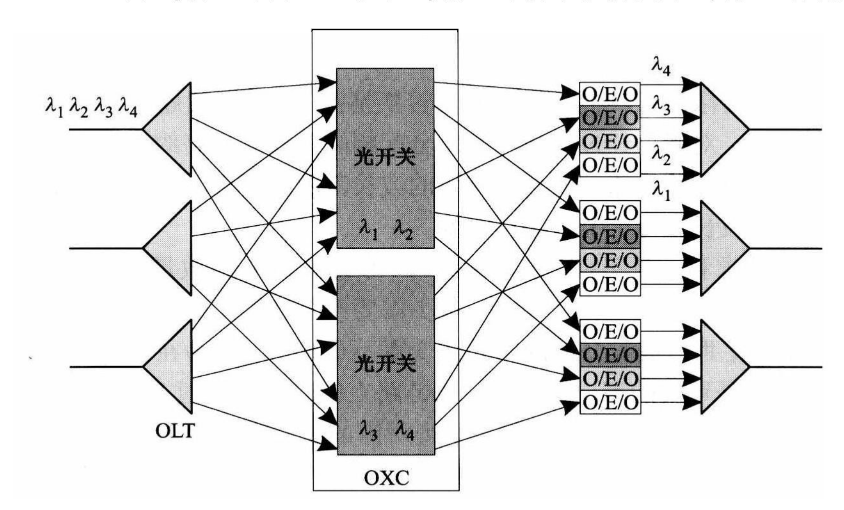


图 7.11　一个具有有限波长转换能力的节点。每个输入波长可以转换为两个可能的输出波长之一。以波长 λ_1 或 λ_2 输入的信号能够被转换为 λ_3 或 λ_4。以波长 λ_3 或 λ_4 输入的信号能够被转换为 λ_1 或 λ_2

上述固定和有限的波长转换模式使我们能够节省交换成本，但仍需要为每路信号提供光/电/光(O/E/O)。由于 O/E/O 设备占有成本的很大份量，因此目前只在理论上对这些模型感兴趣。然而，两个其他的因素使得这些模型非常有用。首先，当有实用的全光波长转换器时，很可能这些设备由于内在原因不允许将信号转换到任意输出波长，而只能转换到另一个波长或某些波长子集(见 2.8 节)。因此，在这种情况下有限波长转换就变得非常重要。其次，多纤和无波长转换的网络可以使用这种方法建模，下面将会看到这种情况。

在许多情况下，网络节点之间可以使用多对光纤，以提供更高的容量。现在有多对光纤连接的节点相当于拥有一对光纤并具有有限波长转换能力的节点。图7.12(a)显示了一个节点间有两对光纤但没有波长转换的网络。每对光纤载有 W 个波长。在每个节点上，一对光纤的信号可以切换到另外一对光纤。图7.12(b)显示了节点间只有一对光纤，但在该光纤上载有 $2W$ 个波长的网络。该节点波长转换度为2。这两个网络在其流量承载能力方面是等价的。一个网络支持的任何一组光路也能获得其他网络支持。这个证明留下作为练习(见习题7.11)。因此，可以用等价的具有有限波长转换节点的单纤网络来表述没有波长转换的多纤网络。出于这个原因，在本章中将不会单独考虑多纤网络。

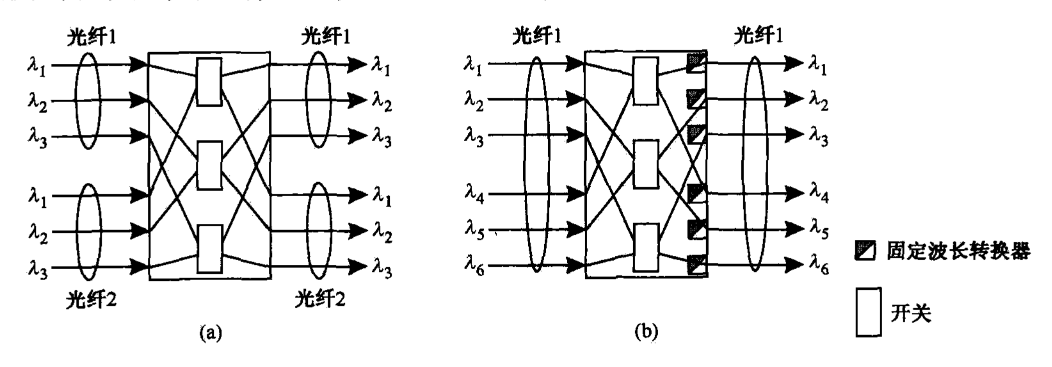


图7.12 多光纤网络和单光纤网络之间的等价性

分别使用下标 NC、FC、C 和 LC 来表示没有波长转换、固定波长转换、全波长转换和有限波长转换。

在全波长转换、有限波长转换和固定波长转换情况下，WA 问题必须加以适当修改。在全波长转换的情况下，对光路经过的每一链路分配相同波长的光路约束完全可以免除。在有限波长转换情况下，分配给光路的波长在有限的波长范围内可以改变。在固定波长转换的情况下，分配给光路的波长在每个节点必须改变。

给定一组光路请求和一条路由，设 l_i 表示第 i 条链路的光路数量。然后，定义一个请求的负载为 $L = \max_i l_i$ 。由第一个约束可知，至少需要 L 个波长来适应这组光路请求。如果网络中存在全波长转换，那么波长分配的问题就变得不重要了，因为在一条给定链路上为光路分配什么波长已不再是重要的事。只要在这条链路上的光路不超过 L 条，L 个波长显然将足以满足这一需求。然而，如果没有波长转换，则所需的波长数量可能要大得多。重要的问题是，波长的数量会多出多少？7.5节中会在不同条件下详细研究这个问题，现在考虑一个(有点极端)例子。

例7.5 考虑图7.13所示的网络。图中显示了光路请求如下。发射机 t_i 必须连接到接收机 r_{N-i+1} ，其中 N 为发射机或接收机数量。显然，每条光路有许多条路由。然而有趣的是，不管如何路由每条光路，任何满足这种请求的两条光路必须共享一条共有的链路。因此，每条光路必须分配不同的波长，总共需要 N 个波长来满足这一系列请求。

如果熟悉如何路由这些光路，如该图所示，可以安排最多让两条光路共同使用一条给定的链路。这意味着负载为2。因此，如果网络中的每个节点有全波长转换，则两波长足以满足这种请求。

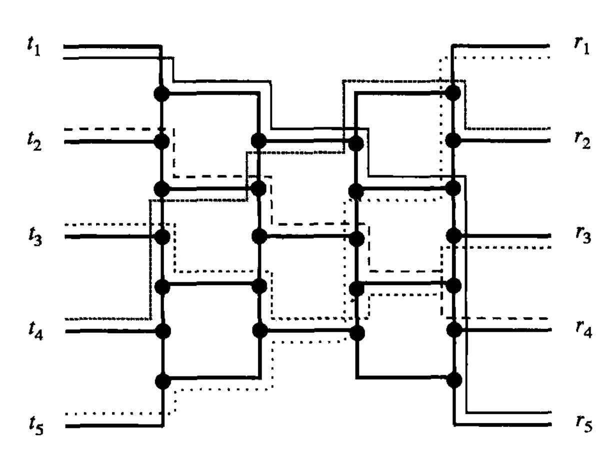


图 7.13 用于说明有波长转换和没有波长转换之间差异的一个例子

这是否意味着绝对需要全波长转换？幸运的是，这里给出的例子是一种最坏的情况。7.5节中将量化由波长转换所带来的好处。

7.3 波长路由网络容量设计

设计波长路由网络的关键环节是确定波长的数量，更一般而言，是给每条 WDM 链路确定必须提供的波长集，称之为波长容量设计问题(wavelength dimensioning problem)。

目前，在大多数实际情况下，都将网络设计得可以支持一定的、确定的流量矩阵。流量矩阵可以用光路或更高层(IP、SONET)的流量表述。在前一种情况下，只有 RWA 问题需要解决，而在后一种情况下，LTD 问题和 RWA 问题都必须(结合在一起或分开)解决。总的来说，这是目前实际中用来设计波长路由网络的方法。RWA 问题的解确定了必须对每条链路提供的一组特定波长，以实现所需的光路拓扑，从而解决了波长容量设计的问题。这是离线的 RWA 问题，因为所有光路立即就给定了。制定和解决该问题在网络规划阶段非常有用。一旦网络投入运营，在光路需要建立时就必须一次解决一条光路的 RWA 问题。这是在线的 RWA 问题。随着运营商正面临的光路业务配置时间的缩短，找到好的、快速的在线 RWA 解决方案变得越来越重要。请注意，7.3 节中讨论过的一些 LTD 和 WA 启发式算法可应用于在线或离线两种之中任何一种情况，因为这些算法一次只解决一条光路的路由和波长分配。

虽然求解离线的 RWA 问题所得到的特定的波长集可以在没有 OXC 设备的网络中配置，但是 OXC 常用在需要灵活处理不同的需要流量矩阵的地方。在没有 OXC 的情况下，光路必须由一个静态的或先验的从每个节点输入波长到输出波长的映射而建立。当网络中存在 OXC 时，利用 OXC 适当的配置，光层可以改变光路拓扑，从而适应不同的流量需求。因此，这种方法可以支持几种不同光路拓扑中的任何一种，也支持更高层的流量需求，这些流量需求具有相同光层设备的同样的光纤拓扑结构。由于更高层流量需求通常是未知的，因此这种灵活性在建设面向未来的光网络时是相当重要的。

例 7.6 为了说明网络中使用 OXC 所获得的灵活性，再次考虑该 3 节点线性网络的例子。通过 30 个端口的可重构 OADM 或 OXC 替换图 7.1(c) 中的静态 OADM，可以得到如

图7.14所示的节点设计。这种设计可以处理任何流量的组合，这些流量不需要在每个节点上终止超过100 Gb/s的流量，而与此相比，图7.1(c)是专为每对节点之间的50 Gb/s的特定流量矩阵设计的。

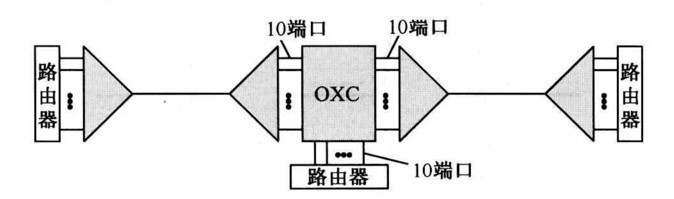


图7.14 由可重构的OADM或OXC替换图7.1(c)中心节点上的静态OADM后的3节点网络。该OXC节点允许一组光路根据光路/流量需求动态地决定在该节点的上/下路

波长容量设计问题的解决不仅确定了每一条链路所需支持的波长数，而且也确定了OLT设备和OXC设备的规模。该OXC的规模还取决于在每个节点终止的光路的最大数量，这相应于该节点上提供的路由器接口卡的数量。

如上所述，现在波长路由网络的设计在当前的实践中是通过预测节点之间某一固定流量矩阵而实现的。这一预测每半年左右修订一次，并在此预测的基础上网络升级，以增加更多的WDM链路上的容量，或者更多的链路，或者更多的节点，或者这些方法的结合。解决网络升级问题类似于解决原有的问题，只是那些已经建立的光路通常不受干扰。

可以查看一下上述预报固定的流量矩阵，并用"确定性"流量模型设计网络，以支持预测流量的方法。这是因为在设计阶段流量的变化没有明确予以说明，虽然在网络中使用交叉连接设备可以使其中的一些变化实际上在建立光路时就得到处理。另一种容量规划方法是使用将在7.4节中讨论的统计流量模型。

在波长路由网络中，如果节点有全波长转换能力，这种情况就如同传统的电路交换电话网络一样：一条光路相当于一个电话呼叫，必须赋予该光路穿过的每一链接一条电路。研究人员广泛研究的另一种方法是没有或有限波长转换能力的网络设计问题，并且期望这种网络能够支持如同在光层中使用全波长转换网络能够支持的相同的流量。这些方法将在7.5节中讨论。在这种情况下，以及在统计模型的情况下，考虑的只是RWA问题，而不是LTD问题。因此，LTD问题中的梳理问题没有加以讨论。确定再生器的位置问题也超出了讨论的范围。

7.4 统计设计模型

两种统计流量模型可用于解决设计问题。这些模型的区别在于它们的假设，是假设支持一组光路还是数组光路。在某些情况下，这些模型还假设每条链路支持同样数量的波长(或同样套波长)，但不可能总是合适的。

1. **首次穿越模型(First-passage model)**：在此模型中，假定开始时网络中完全没有任何光路。光路根据统计模型随机到达，并且必须在光层中建立。虽然有些光路也可能取消，但假设平均起来光路数量将不断增加，最后，建立光路的请求不得不被拒绝。(这时光路请求的出现率超过了光路的终止率，网络处于不均衡状

态。)我们的兴趣是设计波分复用链路，在指定的一段 T 时间周期以后，建立第一条光路的请求被拒绝的概率很高。这是一种合理的适合当今网络状态的模型，因为现在光路的存活周期是很长的。光路的长存活期结合当今高带宽光路的费用，意味着网络运营商不太可能拒绝建立光路的请求。相反，他们为了满足建立光路请求，宁愿通过增大已有链路的容量或增加新的链路的方法升级其网络。时间周期 T 大约对应于经营者必须建立起这样升级的时间，以避免拒绝光路请求的情况发生。

2. **阻塞模型(Blocking model)**：在此模型，处理光路请求的方法与电话网络中处理电话呼叫所采用的方法是相同的。根据统计模型，假定请求在随机瞬间到达和离开。(然而，网络被认为是处于平衡状态的，也就是说，光路的到达率和终止率是相等的。)这种假设是大多数请求都必须得到准许，但请求偶尔可能被阻止。目标仍然是设计 WDM 链路，以使阻塞事件相当罕见(例如，只占1%)。这是一个未来的模式，因为现在的光路存活期较长，但一些运营商将来非常有可能会按需求提供光路。在这种情况下，对于设计 WDM 链路来说，阻塞模型是一种合理的模型。

对于这些统计模型，分析问题比设计问题容易得到解决。例如，在阻塞模式中，计算每一条给定链接容量(及流量模式)的链路阻塞率比设计链路容量以达到预先设定的阻塞率要容易得多。同样地，相比于设计链路容量以达到预先设定的首次穿越时间来说，网络运营商更容易计算在给定的链接容量下不得不停止响应光路请求的首次时间(统计)。不管怎样，容量设计或定规问题在分析问题时可以采用迭代方法来解决。例如，可以计算一组给定容量情况下的阻塞率，以及如果对一些链路来说阻塞是不可容忍的话，可以提高这些链路的容量并重新计算阻塞率。在本节后面将重点讨论分析这些问题。

7.4.1　首次穿越模型

在此模型中，假定网络开始时不存在光路，但给出了链路容量。该模型只有在假设光路请求遵循泊松过程及其持续时间服从指数分布时才易解析处理。(在电话网络中，这是为了统计电话呼叫数据的一种标准假设。因此，这等于假定光路请求的分布类似于电话呼叫分布。)如果马尔可夫链的状态代表了一组正在呼叫的电话，则该网络能够用马尔可夫链模拟。可以考虑有完全波长转换交叉连接和没有波长转换能力的 OXC 两种情况。马尔可夫链方法只有在全波长转换的情况下才稍微容易处理。该模型的一种近似分析可见文献[NS02]。

本书不具体描述分析模型的数学细节，这些数学细节可在文献[NS02]中找到，但介绍一个中等规模网络的这种分析结果。所考虑的网络如图7.15所示。它有20个节点和32条链路，表示了原来的 ARPANET 网络的基本结构。假设对于可能出现在190条路由中的每一条上的光路请求按每月一条的概率出现(但满足泊松分布)。光路的平均租用时间假定为一年(按指数分布)，并假设每条链路的容量是4波长的倍数。因此，图7.15所示的链路容量就已确定，这些链路中任何一条链路在两年内需要升级的概率小于15%。

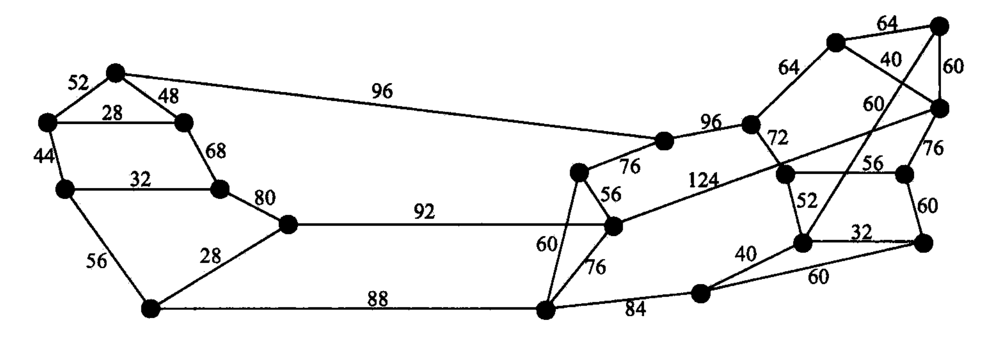


图7.15　有20个节点、32条链路的ARPANET网络基本结构。假设每对节点之间平均每月一条光路请求，并且假设该光路的平均使用周期是一年。如图所示的链路容量按照两年内不需要更新来计算，这种情况有很高的概率(85%)

7.4.2 阻塞模型

在此模型中，假设光路到达和终止请求都遵循统计模式。可以允许一些光路请求被阻塞，但我们对减小阻塞概率感兴趣。在这种情况下，光路流量的度量是输入负载，它定义为光路请求到达率乘以平均光路存活时间。

实际上，最大的阻塞率通常被规定，如1%。然后，要确定的是网络所能支持的最大输入负载。一个较方便的衡量标准是波长重用因子 R，定义 R 为在能够支持指定阻塞率的网络中每波长的输入负载。显然，R 可能取决于:(1)网络拓扑；(2)网络流量分布；(3)实际所使用的RWA算法；(4)可用波长数量。

原则上，如果已知条件(1)~(4)，则可以确定重用因子 R。但对于具体的RWA算法来说，这个问题是难以解析解决的。当网络中源节点和宿节点之间的路由是固定的(固定路由)和可用的波长是随机选择的时，在合理的波长数(例如，多至64波长)下，阻塞概率(重用因子)可以通过分析估算得到。对这些分析技术的讨论超出了本书的范围，但可以参阅文献[SS00]。这种分析结果在给定的阻塞概率下可用于链路容量设计，就像上面讨论过的首次穿越模型中的情况一样。

当路由不是固定的时，是难以解析估计阻塞概率或重用因子的。实际上，估计 R 值的最好方法，甚至对于小型网络来说，也是通过仿真计算来实现的。当小型网络中波长数量非常多时，有可能解析计算出 R 的最大值。文献[RS95]中已经完成了这项计算，并且作为波长数的实际值的重用因子上限。当波长数少时，仿真技术可以用于计算重用因子。为此，总结了来自文献[RS95]的一些仿真结果。将对重用因子的模拟计算结果与解析计算上限进行比较，使用随机选取的网络结构图作为网络模型，假设具有指数占用时间的泊松到达过程、均匀的流量分布，以及使用下面的RWA算法。

算法7.2

1. 编号为 W 的波长可以是波长1至波长 W。
2. 对于两个节点之间光路请求，在两个节点之间固定的最短路径上分配给它第一个可用波长。

图7.16表示了有32个节点、平均连接度为4的随机网络结构的重用因子与波长数的

关系图。该图还显示了可以用无限波长数量来实现的阻塞率值，正如前面提到的，它可以用解析计算得到[RS95]。在有全波长转换的情况下，重用因子值稍微高些。需要注意的一点是，重用因子随着波长数的增加而增大。这是由于众所周知的干线效率(trunking efficiency)现象，电话网络的设计者都熟知该现象。从本质上讲，如果按同样比例增加流量和链路容量，则阻塞概率会降低。为了说明这一现象，考虑一条具有泊松到达分布、输入负载为 ρ 的 W 个波长的单一链路。该链路的阻塞率由著名的 Erlang-B 公式给出：

$$P_b(\rho, W) = \frac{\frac{\rho^W}{W!}}{\sum_{i=0}^{W} \frac{\rho^i}{i!}}$$

读者可以验证:如果输入流量和波长数都用因子 $\alpha > 1$ 来换算，则可得到下式：

$$P_b(\alpha\rho, \alpha W) < P_b(\rho, W)$$

和

$$P_b(\alpha\rho, \alpha W) \to 0 \quad \text{当} \alpha \to \infty \text{且} \rho \leqslant W \text{时}$$

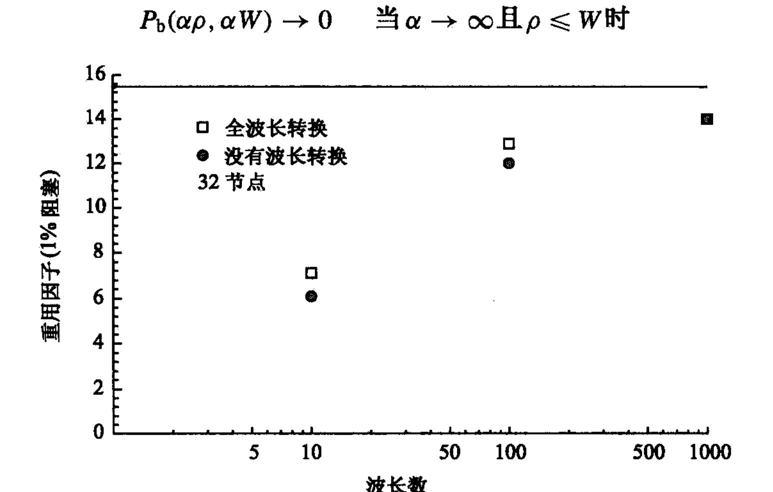


图 7.16 平均连接度为 4 的 32 个节点随机网络结构中重用因子与波长数的关系图，分为全波长转换和无波长转换两种情况，数据来自文献[RS95]。图中水平线表示无限多个波长且具有全波长转换时的重用因子值，该值可通过解析计算得到

图 7.17 画出了重用因子与节点数 N 的关系图。每个节点数 N 的 R 值由平均连接度为 4 的三种不同的随机网络结构的仿真结果平均后得出。该图表明:(1)R 值随 N 增加而增大；(2)有波长转换和没有波长转换之间 R 的差值也随 N 增加而增大。(1)的结果是可以预料的，因为网络中平均光路长度(跳数)随着 $\log N$ 增加，而网络中链路数是随着 N 而增加的。因此，预期重用因子大约随 $N/\log N$ 增加而增大。(2)的结果是因为网络中光路的平均路径长度(或跳数)是随 N 增加的。下面将看到当网络具有较长的路径时，波长转换是更有效的。

在文献[KA96]中对环网进行了类似的仿真计算。在一般情况下，使用波长转换后得到的重用因子值的增加量是非常小的。起初看来，这似乎有悖常理，因为与网状网相比环网的跳长是相当大的。下面将看到，在有波长转换情况下，跳数本身并不是确定增加量的唯一判据。与网状网相比，环网中的光路在大量的链路上存在重叠现象。这种重叠越多，由于波长转换而引起的增加量就越小。

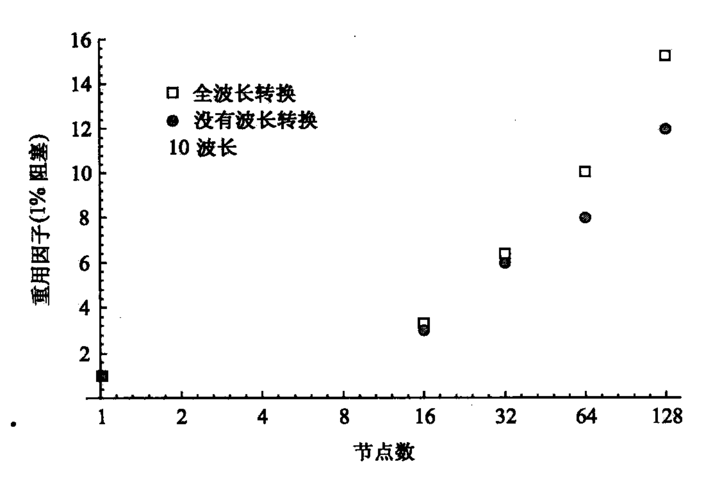


图7.17 平均连接度为4的随机网络结构中重用因子与节点数 N 的关系图，包括全波长转换和无波长转换两种情况(选自文献[RS95])

影响波长重用的因素

下面将量化跳数和光路之间“重叠”对波长转换增益的影响。根据文献[BH96]，假设光路请求满足一种统计模型，在网络中使用波长转换器和不使用波长转换器两种情况下，对一条光路请求被拒绝(阻塞)的概率做了高度简化的比较。假设每条光路通过网络的路由是指定的。当网络中没有波长转换器时，波长分配算法分配该条路由上每一链路一个任意的但都是相同的波长，如果这个波长对该条路由的每一条链路都是空闲的话(即没有分配给任何一条其他的光路)。当网络中使用波长转换器时，波长分配算法将该条路由上每一条链路的一个任意的空闲波长分配给该光路；因此，假设是全波长转换。在这两种情况下，如果波长分配算法无法找到一个合适的波长，则该光路请求被阻塞。

为了计算出光路请求的阻塞概率，我们做了简化假设:某一波长被用于某一链路的概率为 π，并且这一事件与同一链路上使用其他波长无关，也与其他链路上使用的波长无关(无论是相同的波长，还是其他的波长)。如果网络的每条链路上有 W 个波长，以及光路请求选择了一条有 H 条链路的路由，则当网络中不使用波长转换器时，光路请求被阻塞的概率是

$$P_{b,nc} = \left(1-(1-\pi)^H\right)^W \tag{7.12}$$

为了理解这一点，注意在任一给定链路上给定波长闲置的概率是 $(1-\pi)$。因此，根据每一条链路上波长使用的无关性假设，在其路由的所有 H 条链路上该波长空闲的概率是 $(1-\pi)^H$)。因此，$(1-(1-\pi)^H)$ 是在其路由的某些链路上该给定波长不空闲的概率。此外，由于每个波长的利用被假定为与其他波长的使用情况无关，$(1-(1-\pi)^H)^W$ 就是所有 W 个波长在其路由的一些链路上不空闲的概率，即 $P_{b,nc}$。

当网络采用全波长转换时，光路请求被阻塞的概率由下式给出：

$$P_{b,fc} = 1-\left(1-\pi^W\right)^H \tag{7.13}$$

用类似于推导式(7.12)所使用的方法来推导这个等式，留下作为练习(见习题7.23)。

已知阻塞概率，分别用 π_{nc} 和π_{fc} 表示式(7.12)和式(7.13)中的解π。因此，π_{nc} 代表在不使用波长转换器情况下给定阻塞概率时可达到的链路利用率，π_{fc} 代表使用波长转换器情况下给定阻塞概率时可达到的链路利用率。很易理解，它们分别是

$$\pi_{nc} = 1 - \left(1 - P_{b,nc}^{1/W}\right)^{1/H} \tag{7.14}$$

和

$$\pi_{fc} = \left(1 - (1 - P_{b,fc})^{1/H}\right)^{1/W} \tag{7.15}$$

对于小的 P_b值(这是实际感兴趣的情况)和足够小的 W 值时，$P_b^{1/W}$ 值不是很接近于1，因此π_{nc} 和π_{fc} 可以近似为

$$\pi_{nc} = P_{b,nc}^{1/W}/H \tag{7.16}$$

和

$$\pi_{fc} = \left(P_{b,fc}/H\right)^{1/W} \tag{7.17}$$

因此，在相同的阻塞概率下，比值π_{fc}/π_{nc} 近似等于 $H^{1-1/W}$ 。通过这种简化的分析可以得到：网络中不采用波长转换器时，即使对于中等大小的 W 值，可达到的链路利用率也可以近似降低到 $1/H$。

虽然前面的分析进行了高度简化，忽略了一些重要的影响，高估了波长转换器在提高链路利用率方面的作用，但它确实正确地预测了没有波长转换器比使用波长转换器时可达到的链路利用率对路径长度(H)更为敏感。

现在解除以下假设：在某一链路上使用某一波长的概率与其他链路上使用的同一波长无关。不过，会继续假设某一波长产生的事件与其他所有波长产生的事件无关。首先，考虑网络中无波长转换的情况，并计算光路请求在通过有 H 条链路形成的路由时所产生的阻塞概率。任何已经建立并使用这些 H 条链路之一的光路被称为干扰光路。假设使用的这些 H 条链路之一(如第 i 条链路)的干扰光路不再使用下一条(第 $i+1$ 条)链路的概率是π_l。(因此，具有概率π_l 的一条光路，它在光路请求选择的路由中第 i 条链路上产生干扰，则在其后这条链路将被释放。)对于任何波长λ，也假设一个新的光路请求(不对第 $i-1$ 条链路产生干涉)会干扰光路请求所选择的路由中第 i 条链路的概率为π_n。可给出使用第 i 条链路上使用波长λ 的条件概率如下：

Prob(在第 i 条链路上使用波长λ| 在第 $i-1$ 条链路上不使用波长λ) = π_n

和

Prob(在第 i 条链路上使用波长λ| 在第 $i-1$ 条链路上不使用波长λ) = $(1-\pi_l)+\pi_l\pi_n$

请注意，根据这些链路中独立使用相同波长的假设，这两个条件概率的任一个都必须等于π，因此这个假设对应于设置$\pi_l = 1$ 和 $\pi = \pi_n$。

用与推导式(7.12)相同的方法，可以得出

$$P_{b,nc} = \left(1 - (1 - \pi_n)^H\right)^W \tag{7.18}$$

对于全波长转换网络，可以用与推导式(7.18)时使用过的类似假设推导下面阻塞概率的表达式：

$$P_{b,fc} = 1 - \prod_{i=1}^{H}\left(1 - \frac{\pi_i^W - (1 - \pi_l + \pi_l\pi_n)^W \pi_{i-1}^W}{1 - \pi_{i-1}^W}\right) \quad (7.19)$$

其中，

$$\pi_i = \frac{\pi_n}{\pi_n + \pi_l - \pi_n\pi_l}\left(1 - (1 - (\pi_l + \pi_n - \pi_l\pi_n))^i\right)$$

在给定的阻塞概率下，π_{nc} 和 π_{fc} 就可以分别从式(7.18)和式(7.19)解出。然后，可以近似得出小阻塞概率下的转换增益 π_{fc}/π_{nc} 和由下式推导出 $H >> 1/\pi_l$：

$$\frac{\pi_{fc}}{\pi_{nc}} \approx H^{1-1/W}(\pi_n + \pi_l - \pi_l\pi_n) \quad (7.20)$$

定义干扰长度为 $L_i = 1/\pi_l$。L_i 是光路请求选择的路由上干扰光路使用的预期链路数的近似值。因此，假设 $H >> \frac{1}{\pi_l} = L_i$，相当于假设光路请求所选择的路径中的跳数远远大于与干涉光路共享的平均跳数。当网络连通良好时，这是一个很好的假设，但对于诸如环形网来说，它是一个不好的近似。

假设在每一条链路上使用的波长相互无关($\pi_l = 1$)，转换增益近似为 $H^{1-1/W}$。因此，由式(7.20)给出的转换增益比上述近似值给出的转换增益要低一个因子($\pi_n + \pi_l - \pi_l\pi_n$)。该因子是混合概率(mixing probability)：光路请求选择的路由中某一节点上，干扰光路释放或增加新的干扰光路的概率。因此，在混合概率高的网络中，转换增益也是高的，例如，在密集的网状网中节点度(开关规模)大，相反，环形网中混合概率小，干扰长度大。

总之，路径长度仅为控制利用波长转换得到的重用量的因素之一；干扰长度和开关规模是其他的重要因素。

基于上述描述的技术，对 WDM 环形网络的分析结果可以阅读文献[SM00]。

波长分配和备用路由

到目前为止，在使用流量统计模型研究 RWA 问题时，假设在每个源-宿节点对之间是固定路由。现在将给出一些仿真结果来表明使用备用路由的影响。也将考虑路由被选定后两种不同波长的分配方法。因此，考虑以下 4 种 RWA 算法。

随机算法-1。对于两个节点之间的一个光路请求，随机选择两个节点之间固定最短路径上的可用波长之一。

随机算法-2。在每一对节点之间固定两条最短路径。对于两个节点之间的一个光路请求，随机选择两个节点之间第一条最短路径上一个可用波长。如果没有这样的波长可用，随机选择第二条最短路径上可用波长之一。

最大使用算法(Max-used -1)。对于两个节点之间的一个光路请求，在两个节点之间的一条固定最短路径上的可用波长中，选择网络中在这种情形之下使用次数最多的一个波长。

最大使用算法(Max-used -2)。在每一对节点之间固定两条最短路径。对于两个节点之间的一个光路请求，从两个节点之间第一条最短路径上可用波长中，选择在这种情形之下网络中使用次数最多的一个波长。如果没有这样的波长可用，则在两个节点之间的第二条最短路径上的可用波长中，选择网络中在这种情形之下使用次数最多的一个波长。

所考虑的拓扑结构是文献[RS95]中有20个节点、39条链路的网络。假设每条链路有32个波长可用，并且流量是均匀的(即每对节点之间流量是一样的)。在阻塞概率为1%的情况下，用以上4种RWA算法中的每一种算法得到的重用因子值见表7.2。可见，当采用备用路径时，重用因子值得到相当大的提高。在理想的情况下，希望对较长的路由有较多的备用路由，而对较短的路由有较少的备用路由。这将有助于减小较长路由上的阻塞概率和保证整体获得更好的公平性。否则，短路由比长路由易于获得更低的阻塞。考虑更多的路由通常会增加网络中控制流量，并导致网络节点处增加额外的计算负担，但这对一个中等数量节点的网络来说，不会有太大的意义，因为在这样的网络中光路建立和拆除都是缓慢的。

除了路由选择以外，波长分配算法在确定重用因子上也起着重要的作用。请注意，对于相同数量的可用路径，最大使用算法比随机算法有明显的优势。造成这一现象的直观原因是，最大使用算法的策略提供了在一条特定路由的所有链路上发现相同空闲波长的更大的可能性。最大使用算法的缺点是它需要得知网络中所有其他连接上的所有波长使用情况。当路由和波长分配以分布式方式进行时，这些信息通常要从每个节点定期发布的更新中获得，而这又增加了网络中控制流量负载。

表7.2 文献[RS95]中讨论的20个节点的网络在1%的阻塞概率下利用不同RWA算法所得到的重用因子

RWA算法	重用因子
随机算法-1	6.9
随机算法-2	7.8
最大使用算法-1	7.5
最大使用算法-2	8.3

7.5 最大负载容量设计模型

如上所述，依据容量设计观点，区分波长路由网络与传统电路交换网络的基本特性是全波长转换。如何采用无波长转换/有限波长转换/全波长转换方法来确定网络容量设计，已有许多研究，其目的是与具有完全转换的光层一样支持同样的光路组或多个光路组。在本节中，将介绍在这一领域所获得的一些研究结果。假设光路和网络边缘是无方向性的。

结果大致可分为两类:离线请求和在线请求。离线问题对应一个“静态”网络设计问题，其中只有一组光路获得支持。对该组光路的约束使得其能获得具有全波长转换能力的节点，以及每条链路最多L个波长的网络支持，因为在一条路由的任何一条链路上不可能构成多于L条路由。因此，这组光路的最大负载就是L。一般情况下，在节点不具波长转换能力的网络中，为了支持同样一组光路，每一链路需要的波长数多于L。我们感兴趣的是，在没有波长转换能力节点的网络中，为了支持每一组这样的光路需要增加多少波长数量。

在线RWA相应于这样一种“动态”网络设计的情况：在这种情况下，一次出现一条光路，而且请求到达时必须指定路由和波长，而无须等待知道下面的请求。然而，请求和路由选择是这样的:在任何特定时间不超过L条光路使用任一条链路。因此，具有完全波长转换并且每一链路提供L个波长的交叉连接节点的网络将能够支持所有的请求。在这种情况下，在不具波长转换能力的交叉连接节点的网络中，其任务是对支持同样一些光路组所需增加的波长数进行比较。

这种最大负载模型的一个缺点是为在最大负载L下支持所有光路组所需的波长数量可能会过大。如果允许不支持其中一小部分光路，则它可以大大减少所需的波长数。从这个意义上讲，最大负载模型是一种最坏情况下的设计方法。

7.5.1 离线光路请求

在本节中，将回顾离线光路请求的研究结果。

定理7.1 [ABC+94]设在一个有 M 条边的网络 G 中，已知一组负载为 L 的光路组成的路由，一条光路中跳数的最大值是 D，则足以满足这一请求的波长数目是 $W \leqslant \min[(L-1)D+1, (2L-1)\sqrt{M}-L+2]$。

证明: 观察到每条光路最多可以与 $(L-1)D$ 条其他光路相交，因此路径图 $P(G)$ 的最大度是 $(L-1)D$。具有最大度 Δ 的任何图形可以通过简单的贪婪着色算法使用 $\Delta+1$ 种颜色着色，因此路径图可以使用 $(L-1)D+1$ 种颜色着色，故 $W \leqslant (L-1)D+1$。

为了证明定理的其余部分，假设有 K 条长度 $\geqslant \sqrt{M}$ 跳的光路。在一条边上由于这些光路产生的平均负载为

$$\frac{K\sqrt{M}}{M} \leqslant L$$

由此得出 $K \leqslant L\sqrt{M}$。分配 $L\sqrt{M}$ 条不同的波长到这些光路。接下来考虑长度 $\leqslant \sqrt{M}-1$ 跳的光路。这些光路的每一条都最多与其他 $(L-1)(\sqrt{M}-1)$ 条这样的光路相交，因此最多需要 $(L-1)(\sqrt{M}-1)+1$ 个附加的波长。因此，得出

$$W \leqslant L\sqrt{M}+(L-1)(\sqrt{M}-1)+1=(2L-1)\sqrt{M}-L+2$$

这就证明了定理。

一个如图7.18所示的线形网络只不过是节点相互连接成一线的网络。一组光路请求样本也显示在图中。在这种情况下，没有路由选择问题，但波长分配问题仍然存在。研究这种拓扑结构，是因为研究的结果将有助于分析环形网，而环形网在实际应用中是非常重要的。

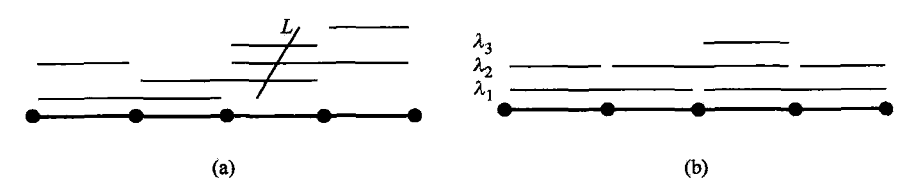


图7.18 (a)具有一组光路的线性网络，也称为区间图;(b)通过算法7.3完成的波长分配

WA-NC 的问题(见7.2.2节)等效于一条线上的着色间隔问题。下面的贪婪算法实现了使用 L 波长的着色。该算法在下述意义上是贪婪的:当将一种颜色分配到一个新的区间时，它绝不会回溯并改变已经分配的颜色。

算法7.3 [Ber76, Section 16.5]

1. 给波长从1到 L 编号。从左侧第一条光路开始，分配给它波长1。
2. 继续从左侧开始给下一条光路分配一个最小编号的可用波长，直到所有的光路都被着色。

环形也许是需要考虑的最重要的拓扑结构。环形是最简单的二连通拓扑，并已被众多的网络标准(FDDI, SONET)采用。期望 WDM 网络将首先采用环形拓扑结构。

在环形中每条光路有两种可能的路由。如果给定一组光路请求，则有一种算法[FNS⁺92]是选择最小可能负载 L_{min} 进行路由。这种算法可能会沿环产生一些最长路由的光路。一种较简单的替代方案是让光路使用最短路径路由，但是这会形成较高的负载，如下所示。

引理 7.2　[RS97]假设给定一源-宿对请求，以及满足该请求的最小可能负载是 L_{min}，则最短路径路由形成的负载至多是 $2L_{min}$。

证明：假设由最短路径路由形成的负载为 L_{sp}。考虑负载为 L_{sp} 的一条链路 i。在环中较长的路由利用链路 i 重新路由 k 条链接，将链路 i 的负载减少了 $L_{sp}-k$。请注意，因为所有这些连接起初都在长度 $\leqslant \lfloor N/2 \rfloor$ 的路径上路由，它们在环上较长路由将全部使用链路 $\lfloor N/2 \rfloor + i$，将它的负载增加了 k，因此最佳路由算法的负载 L_{min} 必须满足 $L_{min} \geqslant \min_k \max(L_{sp}-k, k)$ 或 $L_{min} \geqslant \lceil L_{sp}/2 \rceil$。

事实证明，联合 RWA-NC 问题是很难的，即使在环形中也是这样。但是，在需要多少个波长数量上可以得到一个好的上界。

定理 7.3　[Tuc75]已知一组光路请求和负载为 L 的环形网上的一条路由，WA-NC 可以用 $2L-1$ 个波长来实现。

证明：确定环形网中的一个节点，其最少有 l 条穿过该节点的光路(不计算在该节点起始或终止的光路)。然后，在该节点切断环形网(见图 7.19)。现在，有了一张最大负载为 L 的区间图，可以依据算法 7.3 用 L 个波长对该图着色。然而，还必须处理可能环绕该线边缘的 l 条光路。在最坏的情况下，总能用 l 个附加的波长分配给这些光路，因此总计需要 $L+l$ 个波长。

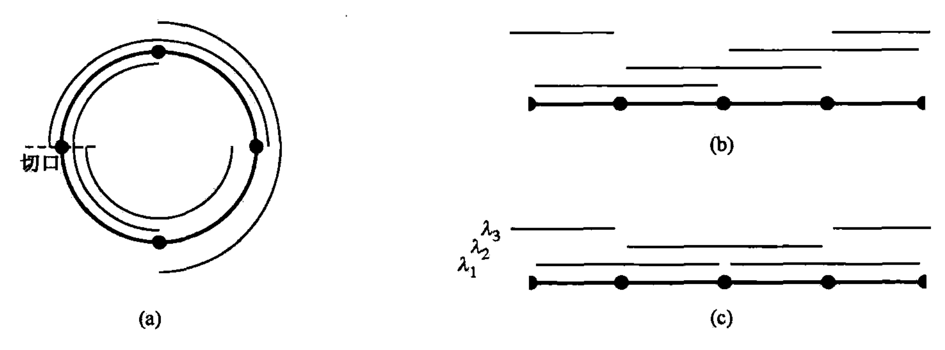


图 7.19　环形网中的波长分配。(a)一个环形网和一组光路；(b)在有最少光路通过的一个节点上切断环形后形成一个线形网；(c)在该线形网中的光路根据算法7.3分配波长，原计划通过被切割节点的光路将被分配给不同的附加波长

现在对于任何一条路由，环形网中有一个节点，其 $l \leqslant L-1$。为了了解这一点，假设所有节点都至少有 L 路径流经它们。存在一个节点，如节点 x，终止了一条路径。设节点 y 是该条路径上与节点 x 相邻的节点。然后，链路 xy 必须有至少 $L+1$ 的负载，这是矛盾的。

构建一个包含 $2L-1$ 条光路、每对光路至少共享一条公用链路的流量模式的例子是可能的。这意味着无论使用什么算法，它们都不得不被分配给不同的波长，结果表明存在一些需要 $2L-1$ 个波长的例子。不过，这种情况并不经常发生。事实上，文献[Tuc75]已经表明，在给定的流量模式中，如果没有 3 条光路覆盖整个环形网，则 $3L/2$ 个波长足以完成波长分配。

这是一个最坏的无阻塞网络模型导致了过度设计网络的例子。为了支持少数一些反常的模式，最终使用了约 $L/2$ 个额外波长。

看看环形网具有了波长转换能力后能获得什么好处。如果网络中所有节点都有全波长转换能力，那么就可以支持负载 $L\leq W$ 的所有光路请求。但也可以通过提供少得多的转换能力得到同样的结果，如下面的结果表明的那样。

定理 7.4 [RS97]*考虑只有一个节点有全波长转换而其他所有节点都没有波长转换的环形网。这个网络能够支持负载 $L\leq W$ 的所有光路请求。*

证明这个结果留下作为练习(习题7.19)。

有限波长转换可以有助于显著改善负载，可以支持许多网络配置。但这种情况下结果的详细推导超出了本书的范围。在这里总结主要成果。

定理 7.5 [RS97]*考虑如图 7.20 所示的环形网，其中一个节点上有固定波长转换，可将波长 i 转换为波长$(i+1)$值对 W 取模后的那个波长，其他节点上没有波长转换。这个网络能够支持负载 $L\leq W-1$ 的所有光路请求。*

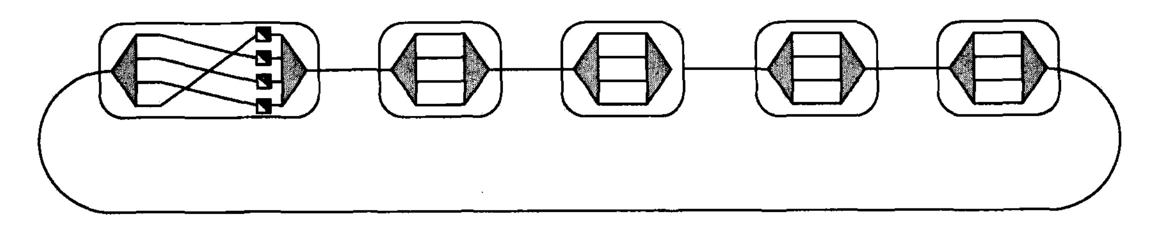




图 7.20 在一个节点上有固定波长转换而其他所有节点没有波长转换的环形网，能够支持负载$L\leq W-1$的光路请求。其中一个节点配置可将波长i转换成$(i+1)$对W值取模后的那个波长，其他节点没有波长转换

如果在 2 个节点上有 $d=2$ 个有限波长转换，而其他节点没有波长转换，则有可能将这一结果改善至 $L\leq W$[RS97]，使这样一个网络的性能可以与每个节点都有全波长转换的网络性能一样好。

文献中也考虑到如星形网络和树形网络等其他网络的拓扑结构。在星形网络和树形网络中，$3L/2$ 个波长足以解决 WA-NC 问题[RU94]。在星形网中，L 个波长足以解决 WA-FC 问题[RS97]。同样的结果可以扩展到光路最多只有 2 跳的任意网络。表 7.3 中汇总了这个问题的最新研究结果。这个问题仍然是一个热门的研究课题。

多纤环

在文献[LS00]中，研究了多纤环网中的波长分配问题。在多纤环网中，每一对相邻节点用 $k>1$ 对光纤连接:每个方向用 $k>1$ 芯光纤传输，而不是用一芯光纤。回想一下，正在考虑的无方向边线和光路，每条边代表了一对光纤，每个传输方向各有一芯光纤。因此，这样一个多纤环网每对相邻节点间可用 k 条边表示。网络中没有波长转换，但假设每一节点中同一

波长可以从输入光纤交换到 k 芯输出光纤中的任一芯。文献[LS00]证明了多纤环网的以下结果。

表 7.3　在有/无波长转换两种情况下，实现离线波长分配所需波长数量作为负载 L 的函数。对任意拓扑结构的固定波长换算的结果只适用于单跳和双跳光路

网　络	转换类型			
	无　转　换	固定转换	全　转　换	有限转换
任意	$\min[(L-1)D+1,\ (2L-1)\sqrt{M}-L+2]$	L	L	
环形网	$2L-1$	$L+1$	L	L
星形网	$\frac{3L}{2}$	L	L	
树形网	$\frac{3L}{2}$		L	L

定理 7.6　[LS00]已知每条多芯光纤链路上负载为 L，由 k 对光纤组成的环形网上的一组光路请求和一条路由，需要解决波长分配问题的所有光纤上的波长总和不会超过 $\lceil \frac{k+1}{k}L-1 \rceil$。

因此，对于双光纤对环形网($k=2$ 时)，所需的波长数不超过$\lceil \frac{3}{2}L-1 \rceil$。该界限相对于单纤对环形网的上界 $2L-1$ 来说，已经有了明显改善。

正如在单光纤对环形网的情况那样，能提出一套负载为 L 的光路请求，但在这种情况下，对多光纤芯数多重性 k 的各种数值来说，所需波长数量的上限裕度不大。

7.5.2　环形网中在线 RWA 问题

接下来，考虑环形网中在线波长分配问题。假设光路的路由已知，并知光路的建立与拆除；也就是说，光路并不是长久不变的。这里，更加难以拿出智能算法，使其用于对没有全波长转换的网络能够支持的负载最大。(在所有节点上都有全光波长转换时，赋予任一空闲波长的算法都能支持负载高达 W 的所有光路请求。)将描述一种算法，使之能给无波长转换的线形网和环形网提供有效的波长分配。

引理 7.7　[GSKR99]设 $W(N,L)$ 代表无波长转换的 N 个节点的网络中支持负载为 L 的所有在线光路请求所需的波长数量。在线形网中，当 N 是 2 的幂时，$W(N,L) \leqslant L + W(N/2,L)$。

证明： 将线形网络中段分开，分成两个不相交的子线形网，每个子网有 $N/2$ 个节点。将光路请求分为两组：一组包括完全在子网内的光路，另一组包括在两个子网间穿越的光路。最多需要 $W(N/2,L)$ 个波长(相同的波长组可用于两个子线网中)支持前一组的光路。后一组的光路最大可有负载 L。将额外的 L 个波长专门用于这一组。引理证明完毕。

在附加 $W(1,L)=0$[或 $W(2,L)=L$]条件下，下面的定理由引理 7.7 立即得到。

定理 7.8　[GSKR99]在一个有 N 个节点的线形网中，负载为 L 的所有在线光路请求最多可以用 $L\lceil \log_2 N \rceil$ 个波长实现，而无须进行波长转换。

这个定理隐含的算法是相当有效的，因为它可能给出光路流量模式，对该模式任何算法都至少需要 $0.5L\log_2 N$ 个波长[GSKR99]。

定理 7.9 [GSKR99]在一个有 N 个节点的环形网中，负载为 L 的所有在线光路请求最多可以用 $L\lceil\log_2 N\rceil + L$ 个波长实现，而无须进行波长转换。

这个定理的证明留下作为练习(习题7.21)。

当正在建立永久性的光路时，它有可能获得更好一些的波长分配，如同下面的定理给出的那样。但本定理的证明超出了本书的范围。

定理 7.10 [GSKR99]在一个有 N 个节点的环形网中，负载为 L 的所有在线永久性光路请求，(a)最多可以用 $2L$ 个波长实现，而不需要波长转换，(b)最多可以用 $\max(0, L-d)+L$ 个波长实现，但需要波长转换度 $d(d\geq 2)$ 的有限波长转换。

表7.4总结了迄今为止以最大链路负载为特征的流量模型的环形网中在线和离线RWA问题的研究结果。对于这种模型，观察到通过在网络中使用波长转换器可以显著增加流量负载。对于离线情况，非常有限的转换几乎提供了与全波长转换一样的好处。对于在线情况，可获得支持的负载比离线情况小得多。需要说明的是，如图7.13所示，这个模式代表了最坏的情况，多数流量模式也许可以不需要这么多的波长或波长转换就可以获得有效支持。

表7.4 环形网中对负载为 L 的包括离线和在线在内的所有流量模式所需波长数量的界限，选自文献[GRS97，GSKR99]。d表示波长转换度。上界表示利用一些RWA算法可满足最大负载为L的所有流量模式所需的波长数量。下界表示有一些最大负载为L的流量模式需要很多波长而与所采用的RWA算法无关。对于在线流量模式，考虑两种情况：一种是光路已经建立了一段时间，但绝不会被拆除，另外一种是光路建立和拆除都会维持一段时间

转换度	W下界	W上界
	离线流量模式	
无转换	$2L-1$	$2L-1$
固定转换	$L+1$	$L+1$
≥ 2	L	L
	无光路终止的在线模式	
无转换	$3L$	$3L$
固定转换	L	$3L$
全转换	L	L
	有光路终止的在线模式	
无转换	$0.5L\lceil\log_2 N\rceil$	$L\lceil\log_2 N\rceil + L$
全转换	L	L

总结

本章研究了波长路由网络的设计。构建波长路由网络而不是简单地建立点至点的WDM链路，会有明显的好处。其主要的好处是，流量不终止于一个节点内，而是直通穿越该节点，可以显著节省高层的终端设备。

这些网络设计比传统网络要复杂得多。它包括高层拓扑结构设计(IP或SONET)，这是

光路拓扑设计问题;及其在光层实现，这是路由和波长分配问题。如果运营商在自己的光纤基础设施上提供 IP 或 SONET VT 的同时需要解决这些问题，显然是很难做到的。实际的方法可能就是多次不断地解决这些问题。

然后，讨论了波长容量设计问题。本书中的问题就是给波长路由网络链路提供足够的容量，以处理预期光路的需求。现在采用定期预测流量矩阵和(重新)设计的网络以支持预测矩阵的方法来解决这个问题。另外，还可以采用统计流量需求模型来估计所需的容量，并且讨论两种这样的模型。

网络中没有波长转换时可在链路上采用更多波长的方法来解决。在最后一节，研究了在各种模式下对这个问题的权衡处理。

进一步阅读材料

为了获得在光层内提供组网功能以节约多少成本的更多了解，请参见文献[RLB95, Bal96, GRS98, SGS99, CM00, BM00]。本章的材料基于文献[GRS98]。关于在 WDM 环形网中所有节点对之间建立连接的问题的讨论，见文献[Wil96, WW98, Ber96]。

光路拓扑设计问题在文献[RS96, KS98, CMLF00, MBRM96, BG95, ZA95, JBM95, GW94, CGK93, LA91]中进行了讨论。我们的讨论是基于文献[RS96]的。这是一个网络信息流方面问题的例子；这些问题在文献[AMO93]中进行了详细的讨论。

有几篇论文[ABC+94, RU94, RS95, CGK92, RS97, MKR95, KS97, KPEJ97, ACKP97]研究了离线路由和波长分配问题。还有大批文献描述了路由和波长分配探索方法。可以查看文献[CGK92, SBJS93, RS95, Bir96, WD96, SOW95]。

如 7.2.2 节所述，有两种常用的方法计算不相交路径。一种方法是首先计算最短路径，然后计算除第一条路径外的第二条路径。由于可能存在多条最短路径，多条备选的不相交路径可以通过计算得到，从中可以选出最佳路径。求解 k 条最短路径问题的算法[Yen71]可以用来产生多条备选路径。计算不相交路径的另一种方法是采用求解最少不相交的路径的算法[Suu74, ST84]。一本在 SRLG 中讨论不相交路径的参考书是文献[Bha99]。

网络设计问题中统计阻塞模型在文献[SS00, BK95, RS95, KA96, SAS96, YLES96, BH96]中进行了分析。

文献[GK97]对在线流量最大负载模型的最坏情况进行了分析。

习题

7.1　在一般情况下，甚至对 3 个节点的网络都有几种有效的设计选择。考虑如图 7.1(c)所示的设计，现假设下路的光路数是 6 路，而不是本书讨论过的 5 路。这种设计的优点是对节点 A-B 和节点 B-C之间流量激增提供了更加灵活的处理。举例来说，这种设计不仅可以处理每对节点之间的 50 Gb/s 的流量需求，它还可以同时处理节点 A-B 和节点 B-C 之间 60 Gb/s 流量需求和节点 A-C 之间的 40 Gb/s 的流量需求。如果只有 5 路光路/波长被下路，则后一种流量模式不能处理。

考虑图7.1(c)中设计，并假设在节点B下路x个波长并直通y个波长。确定设计能作为x和y函数处理的流量矩阵的范围。

7.2 考虑节点A、B、C和D串行、在4节点环形网中使用固定波长路由的网络设计方案，假设流量需求如下：

	A	B	C	D
A	-	3	-	3
B	3	-	2	3
C	-	2	-	2
D	3	3	2	-

(a)对每个波长的流量做周密的路由，以使所需的波长数最少。

(b)如何确定你的路由解对任何算法都使用了最少可能的所需波长数?

(c)每个节点需要多少个ADM来支持这种流量?

(d)如果不使用固定波长路由，你决定使用点至点WDM链路和每个节点接收和转发所有的波长，每个节点需要多少ADM? 波长路由减少了多少个ADM?

7.3 推导式(7.1)。当N是奇数时，其值是多少?

7.4 推导式(7.5)。当N是奇数时，其值是多少?

7.5 针对每对节点之间有一个全双工的光路情况，推导式(7.8)。提示:使用归纳法。从环形网上两个节点开始确定所需波长数。再添加两个节点，它们在环形网上相互截然相反的方向，并继续这样做。

7.6 证明当N是奇数时，式(7.8)被修改为

$$W = \left\lceil \frac{t}{N-1} \right\rceil \frac{n^2-1}{8}$$

7.7 推导式(7.9)。当N是奇数时，其值是多少?

7.8 除了例7.2、例7.3和例7.4所示的网络设计方法外，发展其他网络设计方法，并将结果与这3个例子设计中所需的波长和LT数进行比较。

7.9 在下列条件下，思考7.2.1节中的LTD问题:

- 在节点i和j之间建立一条双向光路的成本$c_{i,j}$。成本包括光路终端的波长转换器及中段的任何波长转换器和放大器。
- 一对源节点和宿节点(s, t)之间的双向流量率是$\lambda^{s,t}$。
- 光路带宽为r。
- 现在的目标是尽量降低网络的总成本。

请给出这个LTD问题的MILP表示法。

7.10 这个习题说明了在每芯光纤都双向传输的网络中波长分配的复杂性。考虑如图7.21所示的两个网络。在图7.21(a)中，网络上每条链路使用两芯光纤，每芯光纤有2个波长并单向传输。在图7.21(b)中，网络上每条链路上使用一芯光纤传输4个波长。每芯光纤上都是双向传输，每个方向上各2个波长。两个网络都不存在波长转换，并且这两个网络都具有相同的标称容量(4波长/链路)。问哪个网络更能有效地利用它们的容量?

7.11 证明:在节点之间有P对光纤、每芯光纤有W个波长、无波长转换的网络，等效于节点之间有1对光纤、PW个波长、每个节点的波长转换度为P的网络。

7.12 将图7.13的案例推论到节点数量是任意的，如N个节点的情况。将这种一般情况下所需波长数目与由定理7.1给出的上限进行比较。

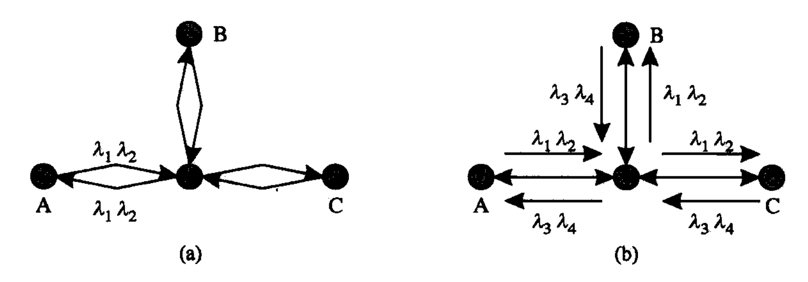


图 7.21　在有双向链路的网络中两种不同的波长分配方法

7.13　为了证明定理 7.1 中的 $W \leqslant (2L-1)\sqrt{M}-L+2$，假设有 K 条长度 $\geqslant \sqrt{M}$ 跳的光路。但如果假设有 $K(x)$ 条长度 $\geqslant x$ 跳的光路，推导对每 x 都成立的 W 的上限。现在请优化 x，以得到 W 的最小上界。并请将这个上界与由定理 7.1 中得到的上界进行比较。

7.14　证明：算法 7.3 总是用 L 波长进行波长分配。提示：对节点数量用归纳法。

7.15　考虑算法 7.3 的如下修改版本。在第 2 步，该算法允许在固定的一组 L 个波长中指派任一空闲波长，而不是编号最小的波长。证明该算法总能成功地进行波长分配。

7.16　证明定理 7.3 在一些情况下是严格的。换言之，给出一个环形网，一组光路请求和负载为 L 的路由的一个例子，这个例子需要 $2L-1$ 个波长。提示：首先举一个需要 $2L-2$ 个波长的例子，然后在不增加负载的情况下增加额外的光路。请注意，在图 7.19 的例子中表明了这样一个 $L=2$ 的例子。请给出一个 $L>2$ 的例子。

7.17　考虑有一组光路请求的环形网，这组光路请求包含了每对源宿节点之间的一条光路。计算出在有全波长转换和无波长转换情况下足以支持这种设置的波长数量。你由这个解得出什么结论呢？

7.18　给出一个没有波长转换的星形网的例子，该网络需要 $3L/2$ 个波长完成波长分配。

7.19　证明定理 7.4。

7.20　证明定理 7.8。在此证明的基础上为波长分配算法编写伪代码。

7.21　证明定理 7.9。

7.22　本习题涉及网络中没有波长转换时的波长分配问题。假设网络中的链路是双向的，也就是说，是由两个相反方向的单向链路组成。已知一组双向光路请求及其路由。在实际中，两个节点 A 和 B 之间的每个光路请求包括从节点 A 到节点 B 的光路 l 和从节点 B 到节点 A 的另一条光路 l'。假设这两条光路都沿着网络中的相同路径路由。

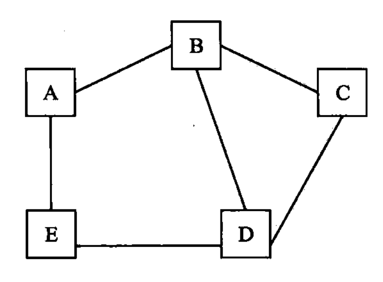
一种波长分配方案（方案 1）是给 l 和 l' 都分配相同的波长。请举一个例子，证明给 l 和 l' 分配不同的波长（方案 2）可以实现更好的波长分配（使用更少的波长）。利用这个范例，证明方案 1 可能需要多达 $3W/2$ 个波长，其中 W 是方案 2 所需的波长数。提示：考虑用一个相应于定向光路的路径图来表示。

7.23　当网络采用全波长转换时，推导光路请求被阻塞的概率表达式（7.13）。

7.24　推导由式（7.16）和式（7.17）给出的 π_{nc} 和 π_{fc} 的近似表达式。绘制这些近似值和由式（7.14）给出的准确值在 $P_b=10^{-3}$、10^{-4}、10^{-5} 及 $H=5$、10 和 20 跳情况下随 W 变化的曲线，并根据这些曲线研究 π_{nc} 和 π_{fc} 的性能，以及验证这些近似值的精度范围。

7.25　推导式（7.18）。

7.26　考虑如图 7.22 所示的 5 节点光纤拓扑，其中 IP 带宽是 IP 路由器节点对之间通过 WDM 网络路由的带宽。每对节点之间的带宽需求由下表给出。假设所有的带宽需求是双向的，并且在两个相反的方向上采用相同的波长沿着相同的路径路由。



Gb/s	B	C	D	E
A	15	25	5	15
B		5	35	15
C			15	25
D				5

图7.22 习题7.26的网络拓扑图

(a)假设干线采用OC-192c(10 Gb/s)系统，完成每对节点间所需光路数量(即波长)的等效表格。
(b)使用所给的物理拓扑结构，并假设在所有节点中光交叉连接设备内没有波长转换功能，明确说明对每条光路的合理的波长路由设计。清楚地标明沿其端至端路径通过网络的每个波长。
(c)什么是该网络中任何一条链路上的最大负载，以及如何与你正在使用的波长总数相比较?

参考文献

[ABC+94] A. Aggarwal, A. Bar-Noy, D. Coppersmith, R. Ramaswami, B. Schieber, and M. Sudan. Efficient routing and scheduling algorithms for optical networks. In *Proceedings of 5th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pages 412–423, Jan. 1994.

[ACKP97] V. Auletta, I. Caragiannis, C. Kaklamanis, and P. Persiano. Bandwidth allocation algorithms on tree-shaped all-optical networks with wavelength converters. In *Proceedings of the 4th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity*, 1997.

[AMO93] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[Bal96] K. Bala et al. WDM network economics. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 163–174, 1996.

[Ber76] C. Berge. *Graphs and Hypergraphs*. North Holland, Amsterdam, 1976.

[Ber96] J.-C. Bermond et al. Efficient collective communication in optical networks. In *23rd International Colloquium on Automata, Languages and Programming—ICALP '96*, Paderborn, Germany, pages 574–585, 1996.

[BG92] D. Bertsekas and R. G. Gallager. *Data Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.

[BG95] D. Bienstock and O. Gunluk. Computational experience with a difficult mixed-integer multicommodity flow problem. *Mathematical Programming*, 68:213–237, 1995.

[BH96] R. A. Barry and P. A. Humblet. Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):858–867, June 1996.

[Bha99] R. Bhandari. *Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1999.

[Bir96] A. Birman. Computing approximate blocking probabilities for a class of optical networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):852–857, June 1996.

[BK95] A. Birman and A. Kershenbaum. Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 431–438, 1995.

[BM00] R. Berry and E. Modiano. Reducing electronic multiplexing costs in SONET/WDM rings with dynamically changing traffic. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 18:1961–1971, 2000.

[Cah98] R. Cahn. *Wide Area Network Design: Concepts and Tools for Optimization.* Morgan Kaufmann, San Francisco, 1998.

[CGK92] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi. Lightpath communications: An approach to high-bandwidth optical WAN's. *IEEE Transactions on Communications*, 40(7):1171–1182, July 1992.

[CGK93] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi. Lightnets: Topologies for high-speed optical networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11(5/6):951–961, May/June 1993.

[CM00] A. L. Chiu and E. H. Modiano. Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 18:2–12, 2000.

CMLF00] T. Cinkler, D. Marx, C. P. Larsen, and D. Fogaras. Heuristic algorithms for joint configuration of the optical and electrical layer in multi-hop wavelength routing networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2000.

[Dij59] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerical Mathematics*, pages 269–271, 1959.

[FNS+92] A. Frank, T. Nishizeki, N. Saito, H. Suzuki, and E. Tardos. Algorithms for routing around a rectangle. *Discrete Applied Mathematics*, 40:363–378, 1992.

[GJ79] M. R. Garey and D. S. Johnson. *Computers and Intractability—A Guide to the Theory of NP Completeness.* W. H. Freeman, San Francisco, 1979.

[GK97] O. Gerstel and S. Kutten. Dynamic wavelengh allocation in all-optical ring networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Communication*, 1997.

[GLS99] O. Gerstel, P. Lin, and G. Sasaki. Combined WDM and SONET network design. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 1999.

[GRS97] O. Gerstel, R. Ramaswami, and G. H. Sasaki. Benefits of limited wavelength conversion in WDM ring networks. In *OFC'97 Technical Digest*, pages 119–120, 1997.

[GRS98] O. Gerstel, R. Ramaswami, and G. H. Sasaki. Cost effective traffic grooming in WDM rings. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 1998.

[GSKR99] O. Gerstel, G. H. Sasaki, S. Kutten, and R. Ramaswami. Worst-case analysis of dynamic wavelength allocation in optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 7(6):833–846, Dec. 1999.

[GW94] A. Ganz and X. Wang. Efficient algorithm for virtual topology design in multihop lightwave networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(3):217–225, June 1994.

[Jai96] M. Jain. Topology designs for wavelength routed optical networks. Technical report, Indian Institute of Science, Bangalore, Jan. 1996.

[JBM95] S. V. Jagannath, K. Bala, and M. Mihail. Hierarchical design of WDM optical networks for ATM transport. In *Proceedings of IEEE Globecom*, pages 2188–2194, 1995.

[KA96] M. Kovacevic and A. S. Acampora. On the benefits of wavelength translation in all optical clear-channel networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(6):868–880, June 1996.

[Ker93] A. Kershenbaum. *Telecommunications Network Design Algorithms*. McGraw-Hill, New York, 1993.

[KPEJ97] C. Kaklamanis, P. Persiano, T. Erlebach, and K. Jansen. Constrained bipartite edge coloring with applications to wavelength routing in all-optical networks. In *International Colloquium on Automata, Languages, and Programming*, 1997.

[KS97] V. Kumar and E. Schwabe. Improved access to optical bandwidth in trees. In *Proceedings of the ACM Symposium on Distributed Algorithms*, 1997.

[KS98] R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan. Design of logical topologies: A linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 1998.

[LA91] J.-F. P. Labourdette and A. S. Acampora. Logically rearrangeable multihop lightwave networks. *IEEE Transactions on Communications*, 39(8):1223–1230, Aug. 1991.

[LS00] G. Li and R. Simha. On the wavelength assignment problem in multifiber WDM star and ring networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2000.

[MBRM96] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mukherjee. Some principles for designing a wide-area optical network. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(5):684–696, 1996.

[MKR95] M. Mihail, C. Kaklamanis, and S. Rao. Efficient access to optical bandwidth. In *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 548–557, 1995.

[NS02] T. K. Nayak and K. N. Sivarajan. A new approach to dimensioning optical networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, to appear, 2002.

[NTM00] A. Narula-Tam and E. Modiano. Dynamic load balancing for WDM-based packet networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2000.

[RLB95] P. Roorda, C.-Y. Lu, and T. Boutlier. Benefits of all-optical routing in transport networks. In *OFC'95 Technical Digest*, pages 164–165, 1995.

[RS95] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pages 489–500, Oct. 1995. An earlier version appeared in *Proceedings of IEEE Infocom'94*.

[RS96] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):840–851, June 1996.

[RS97] R. Ramaswami and G. H. Sasaki. Multiwavelength optical networks with limited wavelength conversion. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 490–499, 1997.

[RU94] P. Raghavan and E. Upfal. Efficient routing in all-optical networks. In *Proceedings of 26th ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 134–143, May 1994.

[SAS96] S. Subramaniam, M. Azizoglu, and A. K. Somani. Connectivity and sparse wavelength conversion in wavelength-routing networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 148–155, 1996.

[SBJS93] T. E. Stern, K. Bala, S. Jiang, and J. Sharony. Linear lightwave networks: Performance issues. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11:937–950, May/June 1993.

[SGS99] J. M. Simmons, E. L. Goldstein, and A. A. M. Saleh. Quantifying the benefit of wavelength add-drop in WDM rings with distance-independent and dependent traffic. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 17:48–57, 1999.

[SM00] B. Schein and E. Modiano. Quantifying the benefit of configurability in circuit-switched WDM ring networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2000.

[SOW95] K. I. Sato, S. Okamoto, and A. Watanabe. Photonic transport networks based on optical paths. *International Journal of Communication Systems (UK)*, 8(6):377–389, Nov./Dec. 1995.

[SS00] A. Sridharan and K. N. Sivarajan. Blocking in all-optical networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, 2000.

[ST84] J. W. Suurballe and R. E. Tarjan. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths. *Networks*, 14:325–336, 1984.

[Suu74] J. Suurballe. Disjoint paths in a network. *Networks*, 4:125–145, 1974.

[Tuc75] A. Tucker. Coloring a family of circular arcs. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 29(3):493–502, 1975.

[WD96] N. Wauters and P. Demeester. Design of the optical path layer in multiwavelength cross-connected networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(6):881–892, June 1996.

[Wil96] G. Wilfong. Minimizing wavelengths in an all-optical ring network. In *7th International Symposium on Algorithms and Computation*, pages 346–355, 1996.

[WW98] G. Wilfong and P. Winkler. Ring routing and wavelength translation. In *Proceedings of the Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, pages 334–341, 1998.

[Yen71] J. Y. Yen. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, 17(11):712–716, July 1971.

[YLES96] J. Yates, J. Lacey, D. Everitt, and M. Summerfield. Limited-range wavelength translation in all-optical networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 954–961, 1996.

[ZA95] Z. Zhang and A. S. Acampora. A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength reuse. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):281–288, June 1995.

第8章 接 入 网

在前面的章节中，探讨了光网络在城域网和长途网方面的应用。接入网是电信网络从业务供应商的设施到家庭或企业的“最后一站”。由于光纤现在可直接连接到大都市地区许多办公建筑物，基于SONET/SDH技术或基于以太网技术的网络正在被用于给大型企业用户提供高速接入。商业用户是数据业务的大消费者，其中许多业务是以各种速率(从1.5 Mb/s到几吉比特每秒)租用线路的形式传递给用户。与此同时，电话公司和有线电视公司也显然将重点放在网络的发展上，使它们能为个人家庭和中小型企业提供各种业务。这是本章的重点。

如今，家庭实质上得到两种类型的服务：利用电话网络的普通老式电话服务(POTS)和利用有线电视网络的模拟广播视频服务。最近添加到这个混合服务的是用于互联网接入的数据服务，这是利用电话网络的数字用户线(DSL)技术或利用有线电视网络的电缆调制解调技术来实现的。

开发高容量接入网络的早期努力是致力于开发可容纳视频点播在内的各种形式的视频业务和高清电视的网络。不过，用户预期的、未来需求的业务范围是巨大的和不可预知的。今天，最终用户感兴趣的是互联网接入和其他高速数据接入业务两个方面，如远程办公、远程学习、娱乐视频和视频会议等应用。未来，不可预见的应用业务也一定会出现，并在最后一英里的可用带宽上提出不断增长的要求。全方位业务涵盖了包括预期将通过接入网提供各种业务。表8.1中给出了不同的业务及其特性的例子。电话和有线电视公司都正在努力成为提供全方位业务的提供商。

表8.1 必须得到接入网支持的不同的业务类型和每一种数据流的带宽需求

业 务	类 型	下行带宽	上行带宽
电话	交换	4 kHz	4 kHz
ISDN	交换	144 kb/s	144 kb/s
广播视频	广播	6 MHz或19 Mb/s	0
交互视频	交换	6 Mb/s	小
互联网接入	交换	几Mb/s	几Mb/s
IPTV	交换	1~20 Mb/s	小
视频点播	交换	1~20 Mb/s	小
视频会议	交换	6 Mb/s	6 Mb/s
商业业务	交换	1.5 Mb/s~10 Gb/s	1.5 Mb/s~10 Gb/s

从广义上讲，这些业务可以基于三个主要标准分类。首先是带宽需求，可以从电话所需的几千赫兹到视频流所需的数十兆比特每秒，甚至到高速租用线路的几十吉比特每秒。其次是根据这项需求是对称的(双向)，如视频会议那样，还是不对称的(单程)，如广播视频那样。现在大多数商业业务是对称的，其他业务则往往是不对称的，从业务提供商到用户(下行方向)比从用户到业务提供商(上行方向)需要更多的带宽。最后一项标准是看该业务是否

是广播性质的，如广播视频那样每个用户可从中获取相同的信息，或该业务是否是交换性质的，如互联网接入那样的情况，不同的用户可从中获取不同的信息。

在下一节中，将概述不同类型的现有的和新兴的接入网络结构。然后，对两种最有前途的接入结构——混合光纤同轴电缆网(HFC)和光纤到路边(FTTC)及其变种进行更为详细的说明。

8.1 网络体系结构概述

从广义上讲，一个接入网由枢纽、远程节点(RN)和网络接口单元(NIU)组成，如图8.1所示。在电话公司，枢纽就是中心局(世界上许多地方也称为本地交换局)，而在电缆公司，枢纽也被称为头端。每个枢纽站通过网络接口单元为一些家庭或企业服务。网络接口单元可能位于用户位置，也可能本身就为一些用户提供服务。枢纽本身可能就是一个较大网络的一部分，但对于这种情况，可以认为枢纽是发往网络接口单元的数据源和来自网络接口单元的数据接收点。在许多情况下，不是将电缆从枢纽直接连接到每一网络接口单元，而是在枢纽和网络接口单元之间引入另一种分层次的体系结构。每个枢纽可连接到野外配置的几个远程节点，而每个远程节点又连接到单独的一组网络接口单元。枢纽和远程节点之间的网络称为馈送网，远程节点和网络接口单元之间的网络称为分配网。

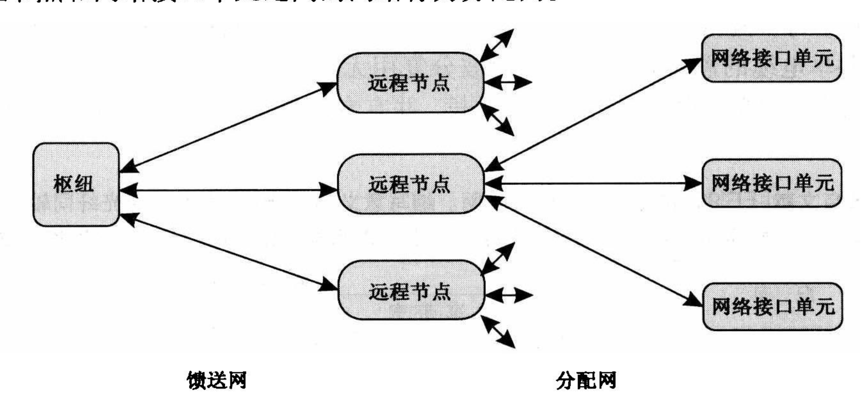


图8.1 接入网的结构。它由枢纽、野外采用的远程节点和网络接口单元组成。枢纽就是电话公司的中心局或电缆公司的头端。网络接口单元是为一位或多位单独的用户服务的

业务可能是广播的或交换的。在同样情况下，分配网也可能是广播的或交换的。请注意，就业务方面而言，使用“广播”和“交换”这两个术语表示所有用户是否得到相同的信息。就网络来说，指的是网络的拓扑结构。业务和网络拓扑结构的不同组合是可能的——广播业务可以得到广播网或交换网的支持，而交换业务也可获得广播网或交换网的支持。在广播网中，远程节点将接收到的来自馈送网的数据转发给与它连接的所有网络接口单元。在交换网中，远程节点处理接收到的数据，并将可能不同的数据流分发给各网络接口单元。稍后研究的电话网络是交换网，而有线电视网络是广播网。广播网可能会比交换网更便宜，非常适合提供广播业务，并且所有网络接口单元都是相同的，使它们更容易配置。(在将研究的某些交换网络中，不同的网络接口单元使用不同的波长，这使得在网络中管理和跟踪网络接口单元的详细清单更为复杂。)顾名思义，交换网适合提供交换业务，并提供更多的安全性。例

如，某一用户窃听其他用户的数据是不可能的，并且某一网络用户想破坏整个网络也是非常困难的。在交换网中发现故障通常也比在广播网中更容易。在广播网中，“智能”都在所有的网络接口单元中，而在交换网中“智能”都在网络层次上。因此，交换网的网络接口单元比广播电视网的网络接口单元要简单得多。

接入网的另一种分类方法是基于馈送网的类型，馈送网是枢纽和远程节点之间的那部分网络。有一种方案是馈送网能给每个网络接口单元分配各自的专用带宽。专用带宽的意义是指对不同的网络接口单元在频域(波长域)分配不同的频带(或波段)。还有另一种方案，在该方案中馈送网的总带宽由所有的网络接口单元共享。共享带宽的意思是指多个网络接口单元在时域上共享一个给定的带宽。在这种情况下，每个网络接口单元短期内可能会占用整个带宽。对于从网络接口单元回传到枢纽方向的上行传输，需要某种形式的媒体访问控制来协调网络接口单元接入到共享带宽。如果从网络接口单元流出或流入的流量是突发性的，则由许多网络接口单元共享一个大的总带宽比给每个网络接口单元分配专用带宽要有效得多。而另一方面，每个网络接口单元在使用专用带宽情况下则有一定的服务质量保证，这是在共享带宽的情况下很难做到的。共享带宽方式的缺点是每个网络接口单元必须有工作于网络总带宽下的光/电设备，而不是网络接口单元所需的带宽。

表8.2中对在本章将要研究的不同类型的接入网进行了分类，分类取决于它们的分配网是广播网还是交换网，以及它们在馈送网中是使用专用带宽还是共用享带宽。例如，电话网是一个交换网，每个网络接口单元有自己的专用带宽4 kHz。有线电视网是广播网，所有网络接口单元共享电缆的总带宽。广播星形波分复用无源光网络(WPON)是一个广播网的例子，每一个网络接口单元分配一个单独的波长，并有专用带宽。这种网络结构将在8.3节中研究。

表8.2 选自文献[FRI96]的不同类型的接入网。缩写意义如下:HFC表示混合光纤同轴电缆网络，DSL表示数字用户线，PON表示无源光网络，T表示电话站，W表示波长，WR表示波长路由

分配网	馈送网	
	共享带宽	专用带宽
广播网	有线电视网络(HFC)、TPON	WPON
交换网		电话、DSL、WRPON

现在，两种类型的接入网已抵达我们的家:电话网和有线电视网。电话网络通过铜双绞线电缆运行。它由电信公司中心局和个人家庭之间的点至点的一对铜缆线组成。一对电线绞在一起以减小它们之间的串话，故名双绞线。工厂的设计是为每个家庭提供4 kHz的带宽，但通过使用现代信号处理技术可以由此得到高得多的带宽。来自每个家庭的电线被汇集在一起，如图8.2所示。电话网是一个交换网，为每位用户提供专用带宽。

图8.3所示是一个典型的有线电视网。它由有线电视公司头端(类似电信公司中心局)和远程(光纤)节点之间的光纤组成。通常情况下，来自头端的频道节目采用副载波复用(SCM)调制方式调制到激光器上，再以广播方式传输到远程节点。从远程节点利用同轴电缆再传输到每个家庭。一个远程节点为500~2000户家庭服务。这种网络称为混合光纤同轴电缆(HFC)网络。所使用的电缆带宽在50 MHz和550 MHz之间，承载了多达78个AM-VSB(残留边带调幅)电视频道，频道采用美国NTSC(国家电视系统委员会)标准，频道间距为6 MHz。同时，可用一个5~40 MHz带宽的回传路径。许多有线电视公司现在已经升级了网

络，可以传输数字电视频道。有线电视网是一种广播网，所有用户共享一个共同的总带宽。同样一套电视节目从头端传送到所有的家庭。

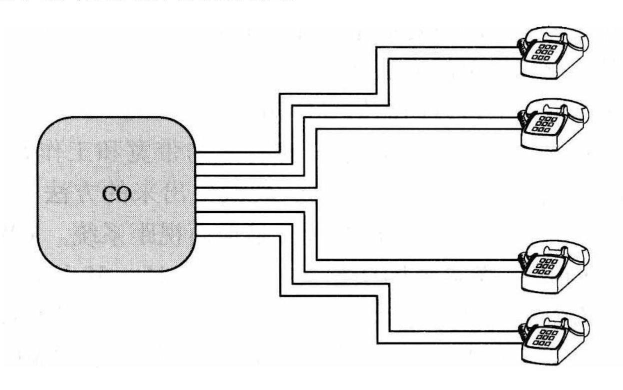


图8.2 双绞线电话接入网，它由从中心局(CO)路由到每位用户单独的双绞线组成

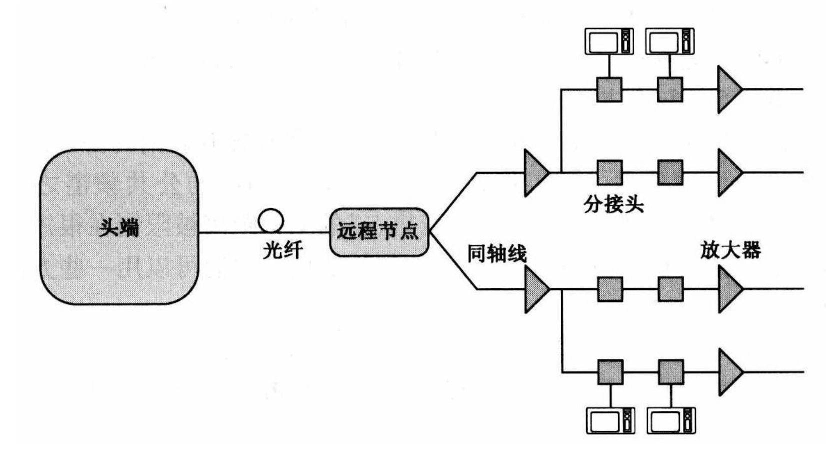


图8.3 混合光纤同轴有线电视网。头端通过光纤将信号广播传输到远程节点，然后通过同轴电缆分配给每位用户

电话网和有线电视网有很大的不同。电话网向每户家庭提供了非常少的带宽，但采用了先进的交换设备，以及运行和管理系统。有线电视网向每户家庭提供了大量的带宽，但它是单向的、广播的，不需要交换，而且管理也很简单。

有几种方法已被用来升级接入网的基础设施，以支持一些新兴的业务。综合业务数字网(ISDN)在现有的双绞线基础设施上提供了 144 kb/s 的带宽。数字用户线(DSL)是在现有基础设施上采用的另一种技术，但明显比 ISDN 提供了更大的带宽。它采用了先进的调制和编码技术，在双绞线上实现了传输几兆比特每秒的带宽，足以传输压缩视频。这就要求中心局(CO)和每个家庭都要有 DSL 调制解调器。然而，DSL 有一定的局限性。可达到的带宽与中心局和家庭之间的距离成反比，现在的技术已经发展到可以在已有的基础设施上传输几百千比特每秒到几兆比特每秒的带宽。现有的双绞线基础设施上采用的 4 kHz 的滤波器必须拆除。上行(回程)路径上的带宽严格限制在几百千比特每秒。现已提出了许多改进和增强 DSL 技术的方案。正如在传统的电话网上那样，ISDN 和 DSL 都可归类于每个网络接口单元有专用带宽的交换网。

卫星提供了另一种方式接入服务。直接广播卫星系统利用地球同步卫星为每户家庭播出几百个频道。一个卫星可以比陆地的同轴电缆系统提供更多的带宽。然而，主要问题是它不同于地面系统，可重复利用的空间带宽数量是相当有限的，因为单个卫星其广播信号所达区域的覆盖面很广。此外，没有简单的方法来处理上行流量。现在可以通过卫星提供高速互联网接入，通过普通电话线进行上行方向的信号传输。

无线接入是另一种可行的选择。虽然它只有有限的带宽和工作距离，但它可以迅速配置，并允许还没有基础设施的供应商进入市场。其派生出来的方法有多通道多点分配业务(MMDS)和本地多点分配业务(LMDS)，这两者都是地面视距系统。MMDS 系统在 2 ~ 3 GHz 频段内提供 33 个 6 MHz 频道，覆盖范围依据发射功率在 15 ~ 55 km 范围内。LMDS 工作在 28 GHz 频段，提供 1.3 GHz 的带宽，适合于短距离(3 ~ 5 km)范围内密集的城域使用(传播距离也取决于降雨量，因为雨水会衰减这一频段内的信号)。LMDS 是无线通信标准、IEEE 802.16或通常称为 WiMAX 等无线通信标准系列的一部分。这些标准可以提供高达 70 Mb/s 的对称带宽和长达 50 km 的通信距离。它们有各种应用，包括点至点链接和便携式互联网接入。WiMAX 能在低于 66 GHz 的较宽的频率范围内工作，包括在 2.3 GHz 到 3.5 GHz 授权频谱和 5 GHz 公共频谱范围内。

一种常见的通过笔记本计算机和其他个人计算机设备连接互联网的公共无线接入技术是 IEEE 802.11 无线局域网技术。它工作在 2.5 GHz 和 5 GHz 的公共频谱之内，可提供约 50 Mb/s的数据率。它们接入到接入点或"无线热点"的工作距离被限制在很短的几十米范围内。这些无线热点往往是在机场、咖啡店、餐厅和旅店内。它们可以用一些方法连接到互联网，包括采用 WiMAX。

使用激光器通过自由空间传输到家庭的空间无线光通信系统也可作为一种可供选择的方法，它正处于开发之中。这些系统可以提供约 622 Mb/s 的容量，传输 200 ~ 500 m 的视距范围。

在本书关于下一代接入网络的内容中介绍了当前正在考虑的两个主要的接入网结构，即所谓的混合光纤同轴(HFC)和光纤到路边(FTTC)方案。HFC 仍然属于广播体系结构，而 FTTC 则采用交换体系结构。

8.2 增强型 HFC

虽然已经使用了专门术语 HFC 来描述现有的有线基础设施，但这一术语也被用来描述这种结构的升级版本，将其称为增强型 HFC 结构。由于光纤和同轴电缆都能承载多副载波调制信息流，并且它是一个广播网络，用来形容 HFC 结构的一个更好的词是副载波调制光纤同轴总线(SMFCB)。网络结构基本上与图 8.3 所示的相同。为了给每个用户提供更多的带宽，网络采用了几种技术的组合而得到增强。首先，发射频率范围可以增加，例如从传统 HFC 系统的 500 MHz 增加到 1 GHz。在更大的城域范围内使用的增强型 HFC 系统可以提供高达 862 MHz 带宽。在每个副载波信道内，可以使用高效利用频谱的数字调制技术，如 256 QAM(正交幅度调制)，它提供了 8 bit/Hz 的频谱效率。此外，可以驱动光纤更深入到网络，并将远程节点所服务的家庭由通常 HFC 网络服务的 500 户下降到约 50 户。还可以利用多芯光纤和多波长来提高网络的总容量。

在典型的增强型 HFC 网络结构中，与已有的有线电视网类似，下行数据通过无源光星形耦合器由头端广播传输至远程(光纤)节点。在最近的配置中，常用 1.55 μm 的高功率发射机配以光功率放大器，能够达到很高的光分束比。此外，1.3 μm 的光信号可以被复用于同一组的光纤。这些 1.3 μm 的信号可用于窄带广播模式。也就是说，这些信号可以只传输给选定的一组用户，而不是给所有用户。此功能可给选定的用户群提供额外的带宽。

从远程节点分出几条树形分支接到网络接口单元。一个网络接口单元能为一个或多个家庭服务。它的功能是将电话信号和广播视频信号分离，并通过双绞线将电话信号及通过同轴电缆将视频信号馈送至它所服务的每个家庭。每条电缆支路约为 50 ~ 500 户家庭服务。从逻辑上讲，这一结构是一种广播总线结构，虽然它是由光纤的星形结构和同轴电缆的树形/总线结构相结合组成的。下行的广播视频是以模拟副载波信道方式送至家庭。视频信号的调制格式是模拟的 AM-VSB 信号流，与家庭内的现有设备兼容。数字视频、电话和数据业务可以承载在相同的基础设施上。此外，还可以在 5 ~ 40 MHz 频段提供上行通道，而不会用于下行流量。图 8.4 显示了增强型 HFC 网络上的带宽分配。

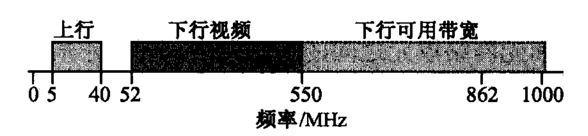


图 8.4 增强型 HFC 网络的带宽分配

在许多城市，有线电视基础设施通过使用一种专门开发的调制解调器可以提供互联网接入业务。这种调制解调器称为电缆调制解调器，分别配置在头端和在家庭用户里。调制解调器使用共享介质的以太网类型的媒体访问控制协议来提供这项业务。这项业务的峰值速率约是数兆比特每秒，但在附近的所有用户之间共享，因为 HFC 网络从根本上说是一种广播网络。每个用户可用带宽的数量取决于有多少其他用户在同时访问网络，以及其他用户所产生的流量。

增强型 HFC 是有线电视业务提供商的自然演进方向。它保持了与现有模拟设备的兼容性，是一种有效地提供广播业务的方法。另一方面，它有基于同轴电缆的解决方案的弊端，如上行带宽有限，有限的可靠性及需要为沿途的许多放大器供电等。

8.3 光纤到路边

与 HFC 相比，在光纤到路边(FTTC)接入网中，数据是以数字形式通过光纤由枢纽或中心局传输至称为光网络单元(ONU)的光纤终端节点的。期望光纤会更接近使用这种接入网的用户。依据光纤离每个用户的距离有多近，采用了不同的专业词汇来描述这些不同的网络结构(见图 8.5)。在最理想的情况下，光纤会进入每户家庭，这种结构称为光纤到户(FTTH)，光网络单元将起到网络接口单元的作用。对于光网络单元将为一些家庭或建筑物服务的情况，如 8 ~ 64 户的情况下，这种接入网可以被认为是光纤到路边(FTTC)或光纤到大楼(FTTB)。通常情况下，对于 FTTC 接入网形式，光纤离最终用户约在 100 m 距离范围内。在这种情况下，光网络单元和网络接口单元之间另有一个分配网。至于在光纤到交换箱(FTTCab)的接入方式中，光纤终止于离最终用户约 1 km 附近的一个交换箱内。

为了使 FTTC 结构可行，从中心局到光网络单元之间的网络是一个典型的无源光网络(PON)。远程节点是一个简单的无源装置，如光星形耦合器，有时它就共同安置在中心局内，而不在野外。虽然 FTTC 有许多不同的网络结构方案，但 FTTC 这个专业词汇常用来描述

从中心局到所属光网络单元广播发送信号的情况，并且这些光网络单元是以时分复用的方式共享一个共同的总带宽。

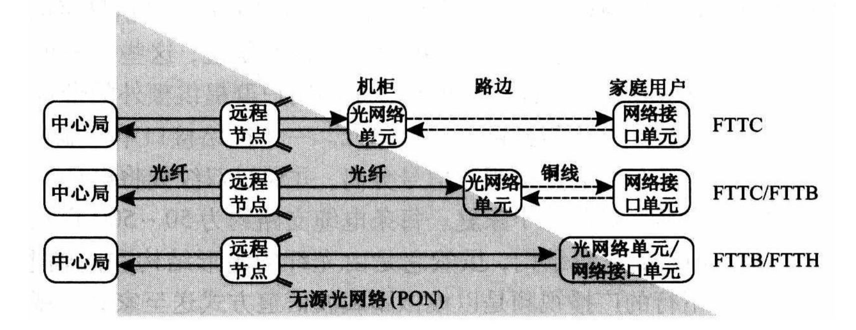


图8.5 依据光纤离最终用户的距离有多近而分为不同类型的光纤接入网。在许多情况下，远程节点就处在中心局本身内。光信号在光网络单元终止，而在光网络单元和网络接口单元之间是铜缆线

在FTTC的情况下，馈送网是中心局和远程节点之间的那段网络，而分配网则是远程节点和光网络单元之间的那段网络。各种不同类型的网络结构可以通过使用中心局处不同类型的信息源结合不同类型的远程节点来实现。

实事求是地讲，现在通过全光纤的基础设施来传输模拟视频信号是相当昂贵的；这可能需要一个模拟的光纤同轴混合装置来承载模拟视频信号。因此，FTTC接入网络结构有时也被称为基带调制光纤同轴电缆总线(BMFCB)或交换式数字视频(SDV)。

接下来，将集中精力讨论用不同的方案来实现接入网中有关光的那部分。光接入网结构必须简单，网络必须易于操作和维护。这意味着，网络本身没有任何交换、也不需要控制的无源结构比有源结构更可取。无源网络除了在端点以外不需要供电，这为运营商节省了大量的成本。此外，为了降低成本和提高可靠性，光网络单元本身必须保持非常简单。这就必须在光网络单元内采用先进的激光器和其他光学元件。在光网络单元中使用的组件必须是能够在无任何温度控制条件下运行的组件。中心局设备可以更先进些，因为它处于受控环境中，其成本可以分摊给中心局服务的许多用户。

为这种接入应用所提出的光网络通常称为无源光网络(PON)，其中所有的组件都使用无源结构。该结构中使用一些无源器件，如光星形耦合器或静态波长路由器，作为远程节点。在这种情况下，采用无源结构的主要优势是它们可靠性高、便于维修及野外部署的网络不需要供电。此外，光纤基础设施本身对传输比特率和调制格式是透明的，整个网络将来在不改变基础设施本身的情况下可以升级。表8.3比较了这些不同的接入网结构。

表8.3 不同PON结构性能比较。N表示在网络中ONU的数量。ONU比特率为1表示ONU运行并终止的流量的比特率，而不是N个ONU汇聚在一起的流量的比特率。节点同步是指网络中的节点是否必须在一个共同的时钟下同步运行。中心局共享是指设备是否在多用户之间共享，或不同的设备是否需要为每个用户服务

结构	光纤共享	功率分配	ONU比特率	节点同步	中心局共享
全光纤	不	无	1	不	不
TPON	是	$1/N$	N	是	是
WPON	是	$1/N$	1	是	不
WRPON	是	无	1	是	是

最简单的 PON 结构如图 8.6(a)所示，该结构中从 CO 到每个 ONU 都使用了单独的一对光纤。这种方法的主要问题是中心局设备的成本随 ONU 的数量成比例增加。此外，运营商需要安装和维护所有这些光纤对。这种方法目前正在有限的范围内实施，主要为企业提供高速业务。在日本，日本电报电话公司(NTT)正在运行这样一种系统，其每芯光纤的传输比特率是 8 ~32 Mb/s。虽然在逻辑上有单独的一对光纤连接到每个 ONU，但实际上光纤可以敷设成环形结构，如图 8.6 所示。

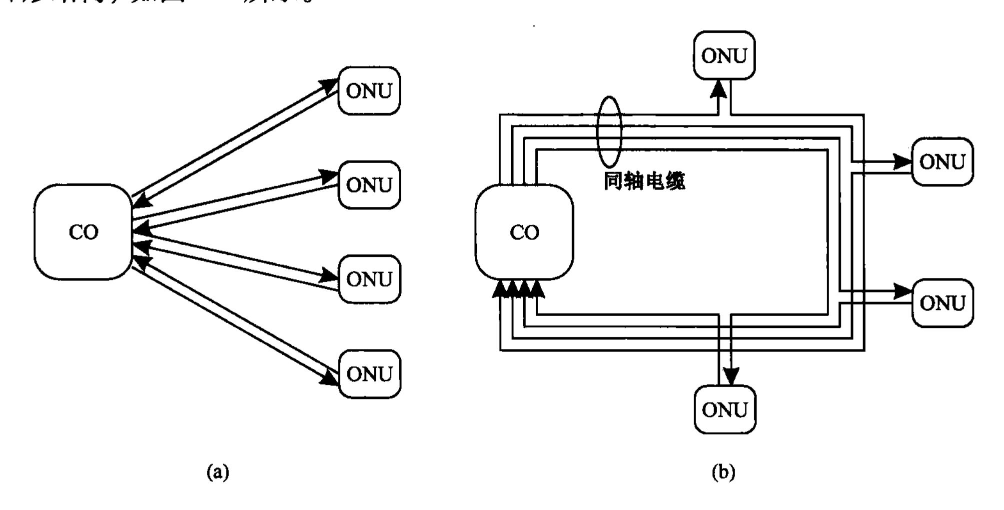


图 8.6 (a)点至点光纤方法;(b)实际中光纤可以被敷设成环形

除了提供一对光纤给每个 ONU 外，也可以利用一芯光纤进行双向传输。然而，相同的波长不能被用在一芯光纤上同时向两个方向传输数据，因为光纤内有不受控制的反射。一种方法是使用时分复用技术让两端不同时传送数据。另一种方法是在不同方向使用不同的波长(例如，分别采用 1.3 μm 和 1.55 μm 波长)。

更常见的不是每个用户专享一对光纤，而是由许多用户共享一对光纤。最常见的这样网络的例子是 SONET/SDH 环网，这是目前广泛采用的对大型企业客户提供高速业务的接入网结构。这些环网传输比特率从 155 Mb/s 到 10 Gb/s。在这种情况下，一个 ONU 就是一个 SONET 分插复用器(ADM)，在同一环网中可能存在多个 ONU。然而，我们并不认为这些光环网是 PON 系列结构的一部分。相反，它们可以被认为是光纤接入解决方案中的一种备选方案。

虽然 SONET/SDH 环网适合于提供高速的业务和满足大型企业客户的需求，但现在这里所学的 PON 结构能够为满足小型和中型企业和家庭的需求而提供一种更有经济效益的解决方案。在该方案里，只需要少数几条 DS1(1.5 Mb/s)线路、DSL 线路或 10 Mb/s 以太网的连接。

最常见的 PON 结构是 TPON(最初称为电话无源光网络)结构[Ste87]，如图 8.7 所示。下行流量由中心局的发射机经过无源星形耦合器广播传送至所有的 ONU。虽然它的结构是一个广播式的结构，但也可根据交换业务带宽的需求，通过给每一个 ONU 分配一些特定的时隙来支持交换业务。对于上行信道，几个 ONU 利用耦合器共享一个通道，再通过固定的时分复用(TDM)或其他一些多接入协议实现。在 TDM 方案中，所有 ONU 需要与一个共同的时钟同步。这是通过一个称为距离修正过程来实现的，其中每个 ONU 需要测量

它到CO的时间延迟并调整其时钟，以使所有ONU相对于CO同步。然后，CO分配给每个ONU所需的时段。

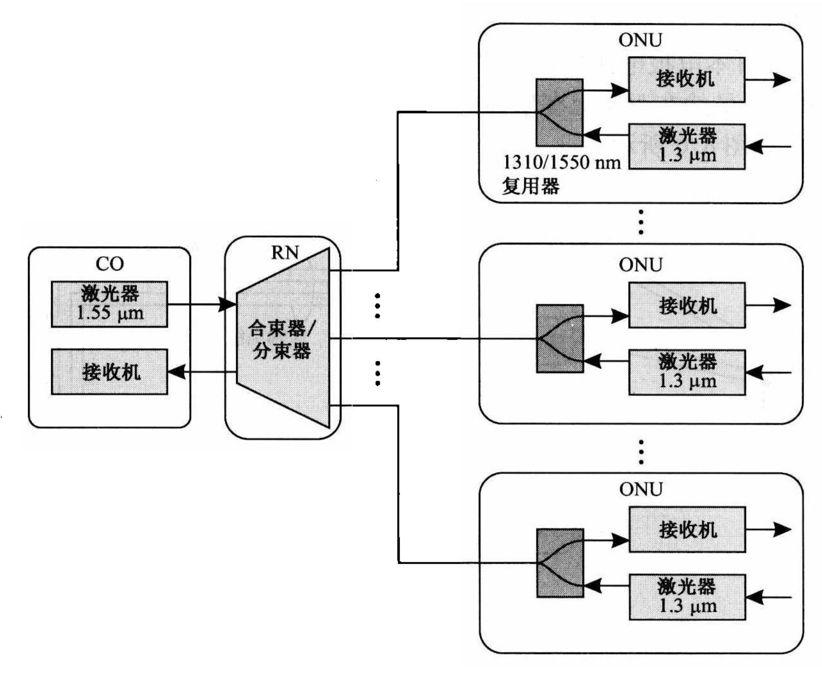


图8.7　一个广播选择的TPON结构。CO利用无源星形耦合器广播下行信号至所有ONU。所有ONU按时分复用的方式共享一条上行信道。在这种情况下，上行和下行信号在单芯光纤内采用不同的波长进行传输

这种结构允许所有ONU共享相对昂贵的CO设备，以及使用相当成熟的低成本的光学元件。CO发射机可以是LED或法布里-珀罗激光器，廉价的不需要致冷的PINFET接收机和LED/法布里-珀罗激光器也可用于ONU内。由于星形耦合器的功率分配损耗的原因，接入网可支持的ONU数量有限。每个ONU必须在电域汇聚所有ONU的比特率。在发射机功率、接收机灵敏度、传输比特率和ONU的数量(由功率分配损耗决定)，以及所覆盖的总距离之间需要进行折中选择。

正如前面所提到的，TPON与SONET/SDH环网相比，在提供低速业务方面可能会更合算。在TPON中，某一用户设备出现故障不会影响其他用户，而SONET/SDH环网任一节点出现故障就会影响环网上的所有节点。然而，无论是在设备出现故障还是在光纤断裂的情况下，SONET/SDH的内置保护机制可以重新路由流量，并迅速恢复业务。相反，如果不把光纤加倍，在TPON结构情况下处理光纤断裂问题是不容易的。同样的道理，在TPON体系结构下可以增添更多用户而不会影响其他任何用户。而在SONET/SDH环网情况下，这是一种比较复杂的过程。

已有一些TPON的标准。首先是ATM无源光网络(APON)。该网络基于异步传输模式(ATM)协议。有关ATM的详细描述可见附录J。APON是由一大群业务运营商和设备公司建立的，称为全业务接入网(FSAN)工作组。该标准规定了高达622 Mb/s的下行带宽和达155 Mb/s的上行带宽。距离指标是20 km，所用光纤的总衰减在10～30 dB范围内。该方案的实际链路预算中，CO和ONU中使用的激光器的功率允许分束建成16～32条分路。例如，

运行在622 Mb/s比特率上、采用32路分束器的TPON可为每位用户提供约20 Mb/s的带宽。宽带PON(BPON)基本上是做了一些改进的APON，并由国际电信联盟(ITU)制定。这些改进包括支持生存性和上行带宽动态分配。

在Gb/s量级速率下的TPON标准是国际电信联盟的千兆无源光网络(GPON)，这是一个APON，以及IEEE的以太网PON(EPON或GEPON)的升级版。GEPON是在PON上运行的千兆以太网。下行带宽是点至多点，上行带宽由TDMA共享。对于GPON，下行带宽可以是1.2 Gb/s或2.5 Gb/s；上行带宽可以是155 Mb/s、622 Mb/s、1.2 Gb/s或2.5 Gb/s，它的限制是不能超过下行带宽。对于EPON，它的上行和下行带宽为1.2 Gb/s。GPON支持ATM及GPON封装方法(GEM)，这类似于通用成帧规程(GFP)，并且高效地传输用户流量。已开发了一种10千兆以太网PON(10G-EPON)采用10 Gb/s下行和依托于较为成熟的技术的1 Gb/s上行的一种非对称结构，以及上行和下行都是10 Gb/s的一种对称结构。

BPON、GPON和EPON的协议支持动态带宽分配(DBA)，其中ONU能够发送其上行带宽需求的信息到CO。例如，GPON中的ONU会发送其上行数据包队列积压信息。CO决定每个ONU能够上行传输的时间间隔，并准予将此信息发送到所有ONU。由于DBA允许上行流量统计复用，带宽可以被超额分配。

下一步，将讨论如何能将WDM技术应用到TPON。WDM可以增加TPON的容量和灵活性，但其是否能够得到广泛采用将取决于其成本是否低廉。

将WDM技术应用到TPON的一种体系结构如图8.8所示，其中CO中用WDM发射机阵列或一个可调谐发射机取代了单个收发机，形成了WDM PON(WPON)。

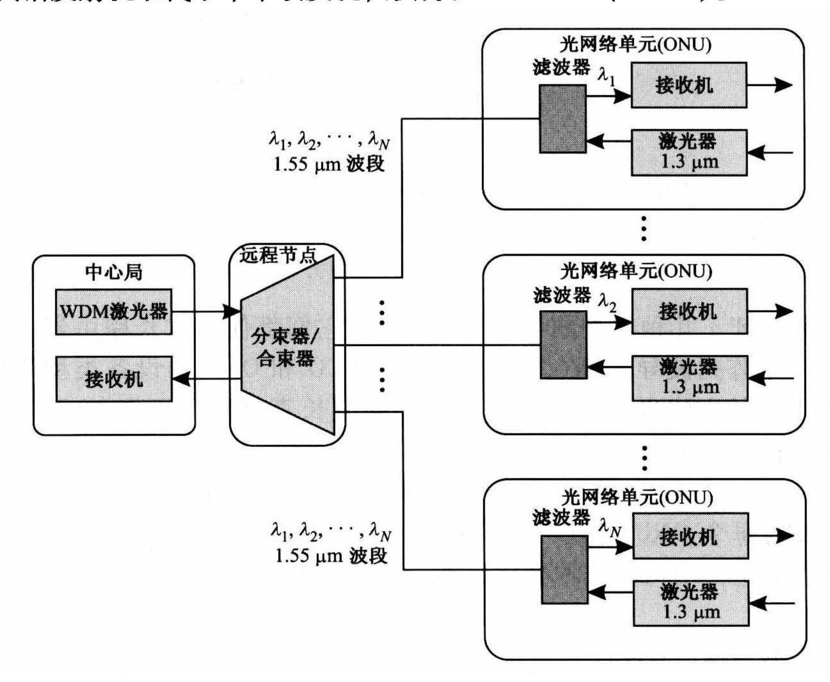


图8.8 一种广播选择WDM PON(WPON)网，这是一个基本PON结构的升级版。在这种情况下，CO广播多个波长给所有ONU，而每个ONU选择一个特定的波长。与传统的TPON一样，ONU分时共享一个其波长与下行波长不同的上行频道

这种方法允许每个 ONU 有电子电路，它只在接收数据的速率下，而不是在总比特率下运行。但是，它仍然受星形耦合器的功率分束所制约。

引入波长路由的方法解决了功率分束损耗的问题，同时又保留 WDM PON 其他所有的优点。此外，它允许给 ONU 提供点至点的专用业务。这导致了图 8.9 所示的 WRPON 结构。

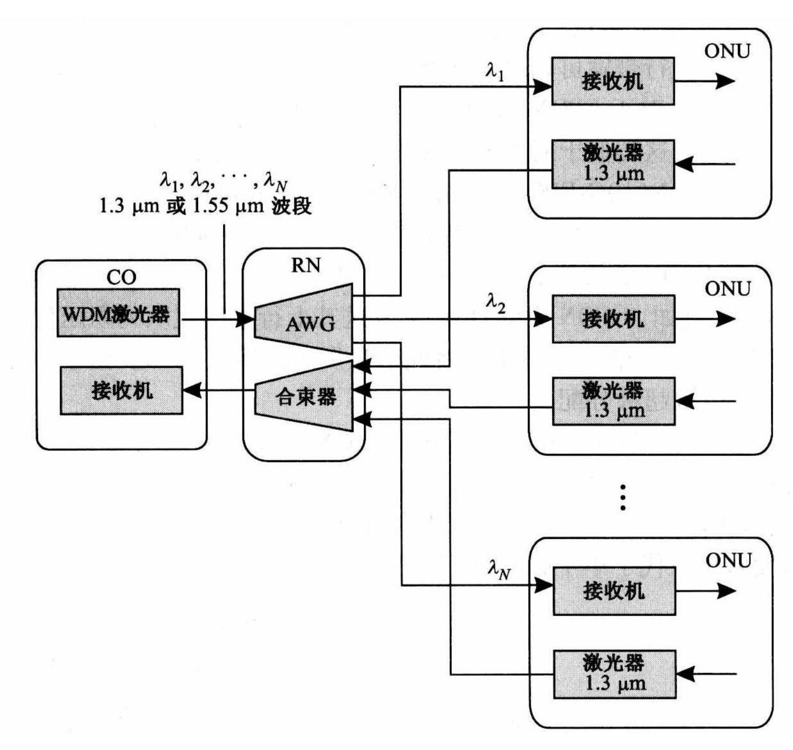


图 8.9 一个波长路由 PON(WRPON)。在这种方案中，一个无源阵列波导光栅(AWG)被用来在下行方向将不同的波长路由至不同ONU，而不会产生光分束损耗。如同TPON和WPON结构中一样，所有ONU分时共享上行传输的一个波长

已经提出并验证了几种类型的 WRPON 结构。它们都使用波长路由器，对于下行流量通常是使用一个阵列波导光栅(AWG)，但位于 CO 和 ONU 的设备类型不同，上行流量是如何获得支持的方法也不同。路由器将不同波长直接导向不同的 ONU。最早的一个示范网是所谓的无源光环网(PPL)[WKR⁺88, WL88]。它的下行传输采用 1.3 μm 波段的 16 个频道，上行传输采用 1.55 μm 波段的另外 16 个频道。然而，这种方法是不经济的，因为需要为每个 ONU 配置两个昂贵的激光器，一个在 ONU 内，而另一个在 CO 内。在此，描述了这种结构的几种变化版本，这些版本能在 CO 和 ONU 内提供更为经济的资源共享。

RITENET 网络结构[Fri94](见图 8.10)在 CO 采用了可调谐激光器。从 CO 发到每个 ONU 的帧结构由两部分组成：数据部分，其中数据是由 CO 发送来的；回程流量部分。如果没有数据发送，CO 的激光仍然工作。给每个 ONU 提供一个外调制器。在帧的回程流量时刻，ONU 使用调制器调制从 CO 来的光信号。这样，ONU 就不需要有激光器。来自 ONU 的上行流量也发送到路由器。路由器将所有不同波长都组合在一起，并发送到 CO 接收机

的一个共同端口。如果 CO 只有一个接收机，那么所有 ONU 必须使用时分复用技术接入到该接收机。另外，如果 CO 用不同的接收机分别接收每一个波长，则每个 ONU 需用各自的专用波长回传上行流量至 CO。这种结构不需要每个 ONU 都有激光器，但每个 ONU 都需要一个外调制器。

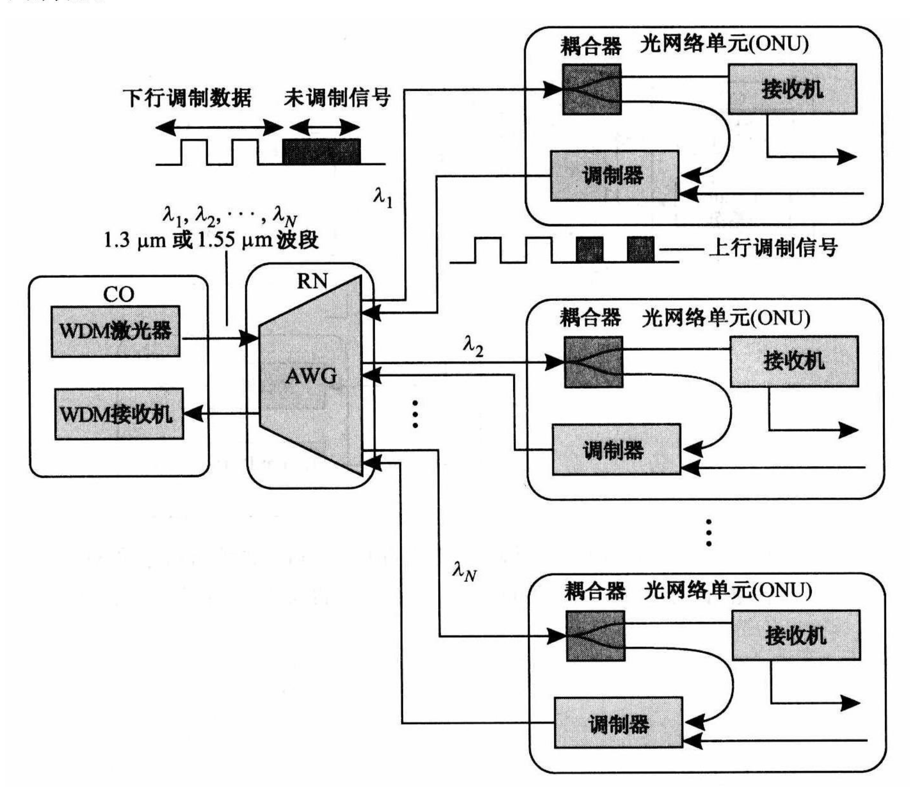


图 8.10 RITENET WRPON 网结构。所有 ONU 用一个外调制器来调制从 CO 发送来的未调制信号

一种替代 RITENET 网的具有更低成本的网络结构是 LARNET 结构[ZJS⁺95]（见图 8.11），其中在 ONU 处用一个 LED 代替原来使用的外调制器，用于上行方向传输。LED 发出一个宽带光谱信号，它被“分束”后通过波长路由器，如图 8.12 所示。只有相应于波长路由器通带内的那部分 LED 光谱的功率被传输到 CO 的接收机。注意，在有 N 个 ONU 的情况下，这至少产生 $1/N$ 的分束损耗，总功率中只有一小部分功率进入路由器的通带内。

更重要的是，CO 的 LED 还可以用于下行传输[IFD95]。在这种情况下，由 CO 的 LED 发送的信号可有效地广播传输给所有 ONU。实际上，CO 内可能有两个发射机：一个是 1.3 μm波段的 LED，它可广播发送到所有 ONU；另一个是 1.55 μm 的可调谐激光器，它可选择性地传送到一些 ONU。这是通过数字交换光纤基础设施来承载广播模拟视频信号的一种重要的低成本方式，因此不必为此目的而使用一个分开的覆盖网来实现。

用于 PON 的 WDM 器件尚不成熟，比简单的广播 PON 网所需的器件更加昂贵。然而，WRPON 比简单的广播 PON 可提供大得多的容量，简单的 PON 网在需要时可升级到 WRPON。

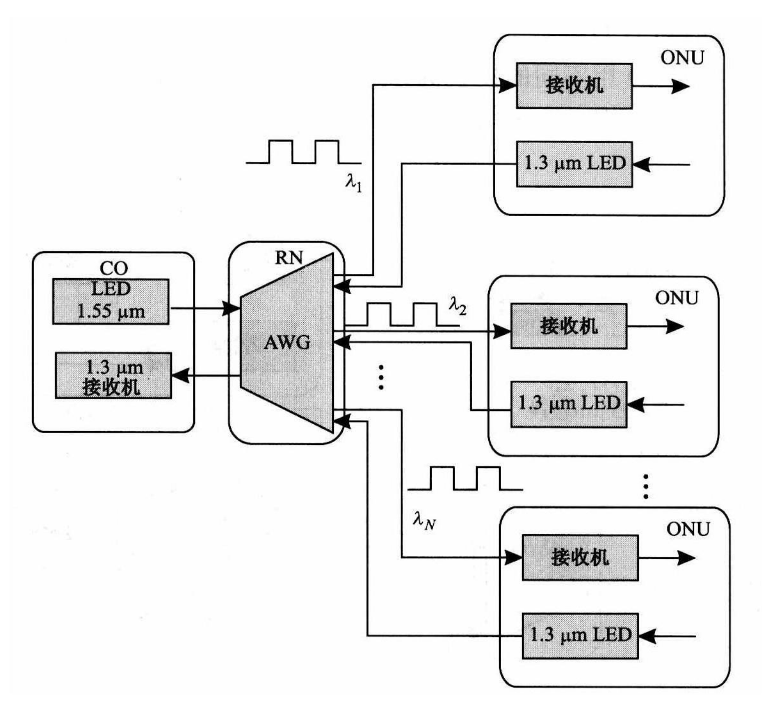


图 8.11 LARNET WRPON 网络结构。一个来自 CO 的 LED 的宽带信号被 AWG 按波长分束后分成不同的波长分量,再分别广播到所有 ONU

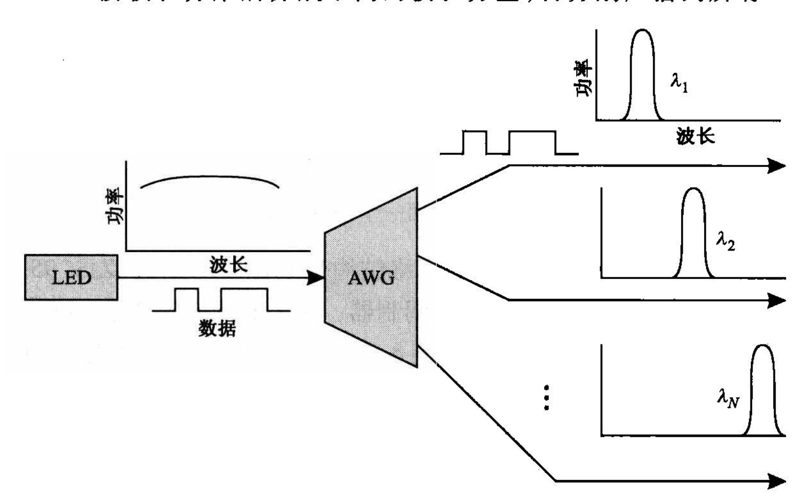


图 8.12 光谱分束:如果 LED 宽带信号经过一个滤波器,只有通过滤波器的那部分光谱能够输出

8.3.1 PON 的演进

在本节,将研究一些 PON 的演变形式。重要的是,要认识到从一个非常简单的 TPON 结构到一些较复杂的 WRPON 结构有一条很好的演进途径。演进可以在对现有业务产生极小的干扰并且不浪费已经装备的设备的前提下进行。一般情况下,终端设备可在需要增加容量和扩展业务时升级,而无须升级外部的光纤设备,这些光纤设备是一项真实的长期投资。PON 的升级方案可以按如下方式进行。运营商开始时可以采用一种简单的广播 TPON,根据分类表 8.2,这是

一种共享带宽的广播星形网。如果需要支持更多的ONU，运营商可以将该网络升级至广播WPON，这是一种给每个ONU提供专用带宽的广播网。通过将CO的发射器升级到波分复用发射机可以实现这一方案，并且运营商可以重用现有的ONU设备。如果每个ONU需要更高的容量，运营商可以进一步将网络升级到WRPON，这是一种有专用带宽的交换网络。此外，这个WRPON也可以使用前面描述过的光谱分束技术来有效支持广播业务。因此，有一条从开始使用共享带宽的广播网到使用专用带宽的广播网，并最终使用专用带宽的交换网的升级途径。

总结

电话运营商和有线电视公司这两个业务供应商，都在积极部署宽带接入网络，以提供各种新的业务。在大都市地区的许多企业都可获得基于光纤的业务。然而，当涉及接入住宅时，光纤尚未到达家庭。SONET/SDH环网结构已经用来支持大型企业客户的需求，但它们并不适合用来支持住宅用户和小型企业客户的需求。宽带接入网络的两种主要结构是HFC和FTTC。HFC是在不断发展当前有线电视运营商部署的设备的基础上发展而来的；光纤到路边(FTTC)结构等价于无源光网络(PON)。与HFC的方法相比，FTTC具有较高的初始成本，但可给网络提供更宽的带宽，有可能被证明是一个更好的长期解决办法。虽然FTTC是属于一种简单的广播式TDM星形PON结构，但也探讨了几种灵活运用的波分复用技术，用以提供更大容量的PON的升级方式。

在美国以外其他许多国家不再敷设同轴电缆的地方，FTTC是有吸引力的。对缺少有线电视基础设施的电话公司来说，FTTC也是一种有意义的选择。

各种不同的FTTC方案已经存在了很长一段时间，但有几种原因使它们应用比较缓慢。首先，构建和部署一个新的接入网的成本很高，这需要几年时间才能偿还。因此，这对摆在首位的投资是一个大障碍。第二，投资能够产生的回报的前景并不明朗。第三，随着器件的开发，特别是为了优化PON的应用，如低成本的、非制冷的半导体激光器和收发器的开发，光器件的成本现在才开始下降。

另一方面，HFC方法对同轴电缆已经敷设到家庭的地方，如美国，是有吸引力的。对已经采用了简单版本的HFC结构并用以提供基本有线电视业务的有线电视公司来说，HFC是一种顺理成章的升级选择。

由于光学器件的成本下降和带宽需求的增加，很明显，光纤将在接入网络中发挥着重要作用；问题是，多久才能接入我们的家庭？

进一步阅读材料

有关接入网的文献非常多。宽带论坛维持了一个涉及家庭到核心网的信息网页(http://www.broadband-forum.org)，其中包括DSL。文献[Bha99]很好地概述了不同类型的DSL。

文献[Fra98, Aar95, Kob94, KKS00, SKY89]描述了在接入网中的开发利用光纤的计划，并比较不同的结构方案。文献[Ste87]中首次提出了TDM PON。国际电信联盟(ITU)的BPON标准是G.983[ITU98]，用于GPON的标准是G.984[ITU04]。IEEE的EPON标准是802.3ah[IEE04]，在写本书时已经提交了10G EPON的标准。10G EPON的概述能在文献[HSM08]中找到。

ITU 和 IEEE 的 PON 结构都允许在上行方向采用动态带宽分配(DBA)，但它们没有明确说明究竟如何给 ONU 分配带宽。因此，DBA 如何分配带宽依赖于设备制造商如何根据服务水平协议实现其算法，以维持对用户的服务质量。对 DBA 算法的概述见文献[MMR04]。

文献[FRI96, FHJ+98, VMVQ00]描述了巧妙利用波分复用技术和光放大器使一些基本 TPON 结构可能产生的演变。文献[WKR+88, WL88, Fri94, ZJS+95, IFD95, IRF96]中描述了各种各样的 WDM PON。对 WDM PON 的概述可以在文献[GJP08]和[BPC05]中找到。

习题

8.1 对本章讨论的不同类型的 PON 结构进行功率预算，并确定每种情况下可以支持的 ONU 数量。假设参数如下：

激光器输出功率	-3 dBm
LED 输出功率	-20 dBm
传输比特率	155 Mb/s
接收机灵敏度	-40 dBm
光纤损耗，包括连接器	10 dB
1×8 波长路由器损耗	5 dB
1×32 波长路由器损耗	9 dB
1×64 波长路由器损耗	12 dB
光分束器的附加损耗	1 dB

通常的波长路由器损耗如上所述。然而，只有一小部分的频谱从波长路由器的每个端口输出，使用谱分束器也产生了额外的损耗。假设除了常规的损失外，在每个通道只获得了 $1/2N$ 的传输功率，其中 N 为 ONU 的数量。

8.2 考虑图 8.10 所示的 RITENET 网络结构。假设在 CO 中的激光器速率限于 155 Mb/s。网络需要支持 20 个 ONU，并从 CO 到 ONU 为每个 ONU 提供 10 Mb/s 的带宽和从 ONU 到 CO 提供 2 Mb/s 带宽。你怎么修改这种网络结构，以满足这一要求?

参考文献

[Aar95] R. Aaron, editor. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Access to Broadband Services*, volume 33, Aug. 1995.

[Bha99] V. K. Bhagavath. Emerging high-speed xDSL access services: Architectures, issues, insights, and implications. *IEEE Communications Magazine*, 37(11):106–114, Nov. 1999.

[BPC+05] A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. Kim, and B. Mukherjee. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (wdm-pon) technologies for broadband access: a review. *Journal of Optical Networking*, 4(11):737–758, Nov. 2005.

[FHJ+98] R. D. Feldman, E. E. Harstead, S. Jiang, T. H. Wood, and M. Zirngibl. An evaluation of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broad-band fiber access. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(9):1546–1559, Sept. 1998.

[Fra98] P. W. France, editor. *BT Technology Journal—Special Issue on Local Access Technologies*, volume 16, Oct. 1998.

[Fri94] N. J. Frigo et al. A wavelength-division-multiplexed passive optical network with cost-shared components. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6(11):1365–1367, 1994.

[FRI96] N. J. Frigo, K. C. Reichmann, and P. P. Iannone. WDM passive optical networks: A robust and flexible infrastructure for local access. In *Proceedings of International Workshop on Photonic Networks and Technologies*, pages 201–212, 1996.

[GJP08] K. Grobe and J.-P.Elbers. Pon in adolescence: from tdma to wdm-pon. *IEEE Communications Magazine*, 46(1):26–34, Jan. 2008.

[HSM08] M. Hajduczenia, H. J. A. Da Silva, and P. Monteiro. Development of 10 gb/s epon in ieee 802.3av. *IEEE Communications Magazine*, 46(7):40–47, July 2008.

[IEE04] IEEE. *IEEE 802.3ah Ethernet in the first mile (EFM)*, 2004.

[IFD95] P. P. Iannone, N. J. Frigo, and T. E. Darcie. WDM passive optical network architecture with bidirectional optical spectral slicing. In *OFC'95 Technical Digest*, pages 51–53, 1995. Paper TuK2.

[IRF96] P. P. Iannone, K. C. Reichmann, and N. J. Frigo. Broadcast digital video delivered over WDM passive optical networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8(7):930–932, 1996.

[ITU98] ITU-T. *Recommendation G.983: Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks*, 1998.

[ITU04] ITU-T. *Recommendation G.984: Gigabit-capable passive optical networks (GPON)*, 2004.

[KKS00] D. Kettler, H. Kafka, and D. Spears. Driving fiber to the home. *IEEE Communications Magazine*, 38(11):106–110, Nov. 2000.

[Kob94] I. Kobayashi, editor. *IEEE Communications Magazine: Special Issue on Fiber-Optic Subscriber Loops*, volume 32, Feb. 1994.

[MMR04] M. P. McGarry, M. Maier, and M. Reisslein. Ethernet pons: a survey of dynamic bandwidth allocation (dba) algorithms. *IEEE Communications Magazine*, 42(8):8–15, Aug. 2004.

[SKY89] P. W. Shumate, O. Krumpholz, and K. Yamaguchi, editors. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Subscriber Loop Technology*, volume 7, Nov. 1989.

[Ste87] J. Stern et al. Passive optical local networks for telephony applications. *Electronics Letters*, 23:1255–1257, 1987.

[VMVQ00] I. Van de Voorde, C. M. Martin, J. Vandewege, and X. Z. Qiu. The superPON demonstrator: An exploration of possible evolution paths for optical access networks. *IEEE Communications Magazine*, 38(2):74–82, Feb. 2000.

[WKR+88] S. S. Wagner, H. Kobrinski, T. J. Robe, H. L. Lemberg, and L. S. Smoot. Experimental demonstration of a passive optical subscriber loop architecture. *Electronics Letters*, 24:344–346, 1988.

[WL88] S. S. Wagner and H. L. Lemberg. Technology and system issues for the WDM-based fiber loop architecture. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 7(11):1759–1768, 1988.

[ZJS+95] M. Zirngibl, C. H. Joyner, L. W. Stulz, C. Dragone, H. M. Presby, and I. P. Kaminow. LARnet, a local access router network. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(2):1041–1135, Feb. 1995.

第9章　光分组交换

本章将研究在光层能够提供分组交换业务的光网络，称这些网络为光分组交换(PPS)网。现在，许多网络，如IP网和以太网，都利用电交换方式提供了分组交换业务。现在，我们感兴趣的是分组交换功能在光域实现的网络。PPS网络的目标是与电子分组交换网络一样提供同样的业务，但有更高的传输比特率。

到目前为止，所研究的光网络提供了电路交换业务。这些网络提供了能按需建立和拆除的光路。在这些网络中，光节点不在数据包至数据包的基础上交换信号，而只是在建立或拆除电路的时间实行交换。分组交换只是在电域通过其他一些设备实现，如IP路由器或以太网交换机等。这些路由器和交换机利用光层提供的光路在它们之间按需建立链路。此外，为了交换数据包，路由器和交换机使用了复杂的软件和硬件来执行分组交换网络所需的控制功能。

在本章中，将看到现在光分组交换所需的所有组成部件处于一种很不成熟的状态，还在实验室的研究之中。即使在该领域经过10年研究之后，它们不是难以实现、很笨重，就是非常昂贵。此外，在可预见的未来，很可能还需要电子设备来执行智能控制功能。光学设备可用来交换通过的数据，但它尚不具备计算能力来执行许多所需的控制功能，如处理数据包的信头、确定数据包的路由、按业务等级确定数据包的优先次序、维护拓扑信息等。

不过，也有一些研究光分组交换的动机。一个是光分组交换在达到更高的容量方面比电路由器更有潜力(尽管这种潜力尚未得到证实!)。例如，当今带有最高比特率40 Gb/s接口的最好的路由器的容量还小于100 Tb/s。相比之下，在大多数情况下，光交换是与比特率无关的，因此它们可以被用来交换几十到数百太比特每秒(Tb/s)的流量。

研究光分组交换的另一个动机是，它可以提高光层内的带宽利用率。由于流量的突发性，路由器之间高速光纤链路仍然没有得到充分利用，而利用一个下层的光分组层代替光电路层将有助于提高链路利用率。问题是，在一个已经存在的分组交换层(如IP)下是否有另一种高速分组交换层，会在统计链路利用率方面提供足够的改善。这个答案取决于流量的统计特性。通常认为，由于很多低速突发的业务流是经过许多层复用的，因此汇聚流的突发度低于单个的流。在这种情况下，在电分组层下的光分组层可能没有多大帮助，因为进入光层的流量已经理顺平滑。但是，最近表明一些类型的突发流量，特别是称为自相似流量的多路复用后的数据流的突发性不低于其复合前的各个流[PF95, ENW96]。对于这样的流量，利用光分组层能提高链路利用率。

图9.1显示了一个普通的存储和转发分组交换网络的例子。在这个网络中，节点$A \sim F$是交换/路由节点，终端节点1~6是分组数据的源节点和接收节点。假设所有的数据包都是固定长度的。在一般情况下，终端节点发送的数据包在到达其宿端节点前要经历多条链路，因此也要经过多个路由节点。例如，如果节点1发送一个数据包到节点6，可以采取几条可能的路由，它们都由多条链路和路由节点组成。如果这个数据包选择的路由是1—A—B—D—F—6，那么这个数据包经过了链路1—A、A—B、B—D、D—F和F—6。通过的路由节点是A、B、D和F。注意，这条所选路由可能是由分组数据包本身指定的，或该数据包可能只

是简单地指定了宿节点，而由其路径中的路由节点选择路由。在其后的讨论中，将假设由路由节点根据分组数据包信头中的目标地址选择路由。

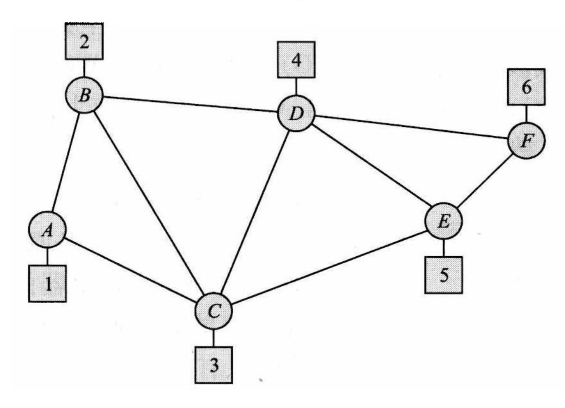


图9.1　一个普通的存储和转发网络

图9.1也是一个PPS网络框图。主要的区别是链路运行在极高的传输比特率下(几百吉比特每秒)和信号大多在每个路由节点内光域下处理。

图9.2所示的框图描述了路由节点或路由器的许多功能。一般情况下，用一条链路将路由节点和终端节点的输入端和输出端相互连接起来。例如，在图9.1中，路由节点A有三个输入端口和输出端口与路由节点B、路由节点C和终端节点1相互连接。同样，路由节点C有5个输入端口和输出端口。路由器完成以下功能(IP路由器如何实现这些功能，其详细说明可见3.5节)。

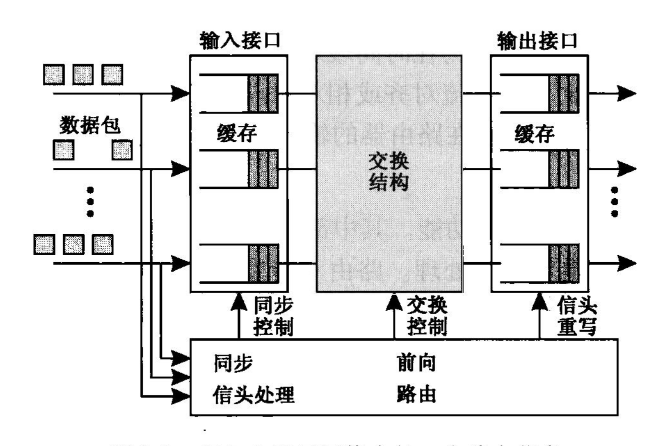


图9.2　图9.1所示网络中的一个路由节点

路由。路由器保持最新的网络拓扑信息。这个信息是以路由表的形式存储在每个节点中的。

转发。对于每个输入的数据包，路由器处理数据包信头并查找其路由表，以确定该数据包的输出端口。它也可能对信头本身做一些改变，再在输出时将改变后的信头重新插入到数据包中。

交换。交换是将输入数据包交换至适当的输出端口的实际进程，该输出端口由转发过程确定。用以执行交换的硬件通常称为开关结构，如图9.2所示。

在第2章中，讨论过可用于实现开关结构的技术。一种开关结构的例子如图9.3所示。

输入端口连接到一个可调谐波长转换器(TWC),后连接阵列波导光栅(AWG),然后是另一级波长转换器(WC),最后是输出端口。为了要将来自输入端口的数据包交换到输出端口,输入端口的TWC调谐其输出波长,使数据包通过AWG路由至数据包的输出端口(见图2.25所描述的信号如何根据其波长路由通过AWG)。在输出端的WC有其固定的输出波长。开关结构的交换速度只受TWC的转换速度限制。对于比特率是数十吉比特每秒或更高的光分组传输来说,交换速度应在纳秒级范围或更低。

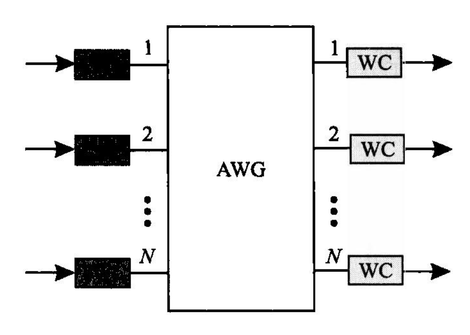


图9.3 一个由波长转换器和AWG组成的光分组交换结构

缓存。路由器中需要缓存的原因有很多。在这方面,也许最重要的一条原因是处理目标的冲突。多个数据包同时到达路由器的不同输入端。其中有一些数据包可能是交换到同一个输出端口。然而在任何时刻,只有一个数据包可以交换到任一给定的输出端口。因此,路由器将不得不缓存其他的数据包,直到轮到它们输出。缓存器也可以根据数据包的优先级或业务类型用于这些单独的数据包。

图9.2显示了输入端及输出端的缓存器。将在9.4节中探讨输入端和输出端缓存之间的折中协调。将看到缓存器在光分组交换情况下是难以实现的,因此,大多数交换协议建议只使用少量的缓存,通常与开关集成在一起。

复用。路由器将许多低速的流复用到高速的流。它们还执行反向的解复用操作。

同步。同步可以被广义地定义为在时间域对准两条信号流的过程。在PPS网络,它是指将一条输入脉冲流与本地时钟脉冲流对齐或相对对准两条输入脉冲流。第一种情况发生在复用和解复用期间,第二种情况发生在路由器的输入处,这里需要将不同的数据包流对齐,以获得良好的交换性能。

PPS的网络将要执行上述所有功能。其中部分功能涉及相当数量的复杂逻辑关系和处理过程,这些功能最好仍在电域进行处理。路由和转发功能特别适合这一类情况。迄今为止,大多数PPS协议都建议数据包的信头在较低比特率下与数据分开传输,并且在电域进行处理。然而,将研究一些方法,至少能在光域进行初步的信头处理。

由于技术的限制,甚至在光域完成转换、缓存、复用及同步等一些功能也是相当困难的。随着对实现这些功能的不同技术的探索,这个问题将变得更加清晰。因此,PPS网络现在仍然处于实验室研究之中,还没有进入商业市场。为了简化执行过程,特别是在控制功能方面,有关PPS的许多协议也都建议使用固定长度的数据包,在本章也将采用与此相同的假设。当然,在现实中也要处理不同长度的数据包。如果在网络内部使用固定长度的数据包,则在网络的输入端将较长的数据包分段,并一起在输出端重新组装在一起。另外,还可设计PPS的节点来交换可变长度的数据包,当然,这是一个更复杂的命题。

本章首先描述时域复用和解复用光信号的技术,其次描述在光域同步的方法。如果两条信息流在时间上错位,同步过程要求其中一条流相对于另一条流产生延迟。在这些方面,还将研究如何实现可调谐光延迟线。然后,讨论各种缓存问题的解决方案。在本章最后讨论突发交换,这是一种PPS网络的变体,以及一些能演示PPS网络各种不同方面的试验研究。

9.1　光时分复用

在网络的输入端，较低比特率的数据流在光域被复用到高比特率的数据流，而在网络的输出端，低比特率的数据流必须在光域通过解复用功能从高比特率的数据流中提取出来。就功能上而言，光时分复用(OTDM)与电时分复用是相同的。唯一的区别是复用和解复用在高比特率下完全在光域进行。光时分复用系统中，复用后典型的比特率是100 Gb/s量级，这种情况将在9.6节讨论。

OTDM如图9.4所示，代表来自多个源的数据流的光信号在时间上间插产生一条单一的数据流。可以做到逐个比特间的间插，如图9.4(a)所示。假设数据是以数据包的形式发送，也可以做到逐个数据包之间的间插，如图9.4(b)所示。如果数据包是固定长度的，则数据包边界的识别要简单得多。下面将假设使用固定长度的数据包。

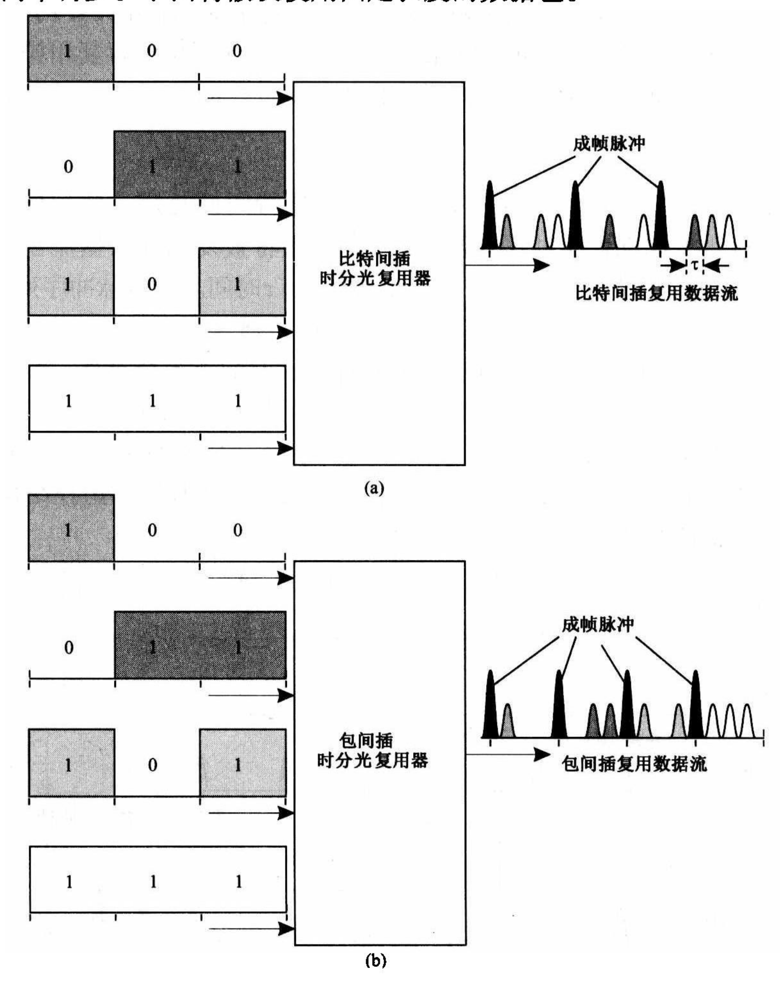


图9.4　(a)比特间插时分光复用器的功能；(b)包间插时分光复用器的功能。在这两种情况下，有4条相同的数据流被复用。为了说明复用原理，在(b)情况下仅采用3比特长度的数据包，实际中的数据包应更长，而且长度不等。请注意，在这两种情况下，都必须压窄数据脉冲的脉宽

在比特间插和包间插两种情况下，都可以使用成帧脉冲。在包间插的情况下，成帧脉冲

标记数据包之间的边界。在比特间插的情况下，如果有 n 条输入数据流被复用，则每隔 n 比特使用一个成帧脉冲。正如稍后将会看到的那样，对于从包间插复用的数据流中解复用出单个数据包，这些成帧脉冲是非常有用的。

从图 9.4 中注意到，极短脉冲——比每个复用数据流的比特间隔还要短得多的脉冲——一定会在时分复用系统使用。鉴于我们对实现从几十到几百吉比特每秒的所有比特率都感兴趣，所需的脉冲宽度在几皮秒(ps)的量级。使用 2.5.1 节中所述的锁模激光器可以生成这样短脉冲的周期序列，或使用 2.5.4 节所述的带外部调制器的连续波激光器也可以生成。由于脉冲非常短，其频谱将是非常宽的。因此，除非采取一些特殊的措施，否则由于色散的影响，脉冲将有明显的展宽。为此，在许多时分复用实验中，使用适当波形的归零码(RZ)脉冲。

假设需要复用 n 条数据流，每条流的比特周期是 T。此外，还假设使用成帧脉冲。那么，脉冲之间的宽度是 $\tau = T/(n+1)$，因为 $n+1$ 个脉冲(包括成帧脉冲)必须在每个比特周期内发送。因此，每个脉冲的时间宽度 τ_p 必须满足 $\tau_p \leqslant \tau$。请注意，通常 $\tau_p < \tau$，所以相继的脉冲之间有一定的保护时间。这种保护时间的目的之一是为了在复用和解复用操作中提供一些容错度。另一个原因是前面所讨论过的，为了防止相邻脉冲之间的不良相互作用。

9.1.1 比特间插

首先，研究如何在光域进行如图 9.4(a)所示的比特间插复用。此运作过程如图 9.5 所示。由锁模激光产生的周期性脉冲序列被分束，为每条将被复用的数据流创建一个副本。供第 i 条数据流使用的脉冲序列，$i = 1, 2, \cdots, n$，被延迟 $i\tau$ 时间。让该脉冲序列传输通过适当长度的光纤，可以实现这种延迟。由于石英光纤中的光的传播速度大约是 2×10^8 m/s，1 m 长的光纤可以延迟约 5 ns 的时间。因此，延迟后的脉冲流在时间上不会重叠。没有延时的脉冲流用于成帧脉冲。每个数据流用来外部调制适当延迟后的周期性脉冲流。外部调制器的输出和成帧脉冲流再经过合束生成比特间插的光 TDM 流。选择让成帧脉冲的功率电平明显高于数据脉冲的功率电平，将会看到这在解复用时是非常有用的。在有星形拓扑结构的广播网的情况下，合束功能自然是由星形耦合器来完成的。

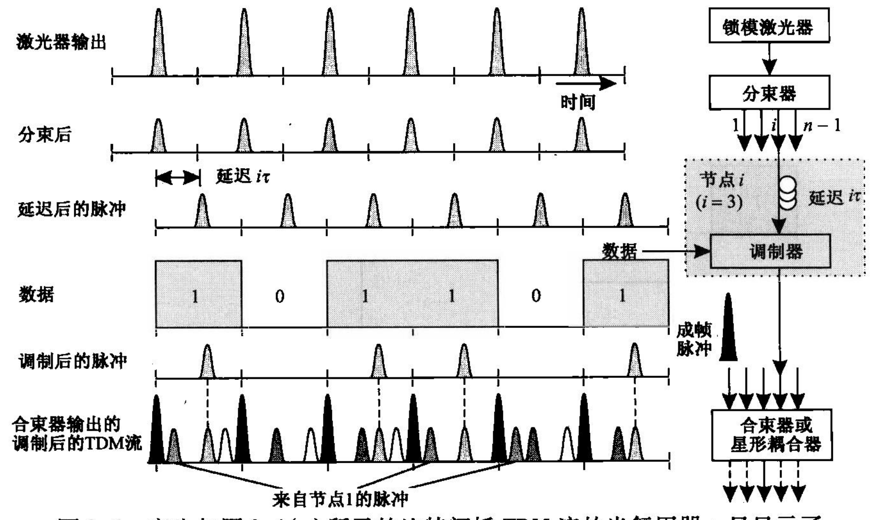


图 9.5 产生如图 9.4(a)所示的比特间插 TDM 流的光复用器。只显示了一个节点(节点3)的运作过程(见第3章参考文献[Mid93])

相应的解复用运作过程如图 9.6 所示。复用后的输入信号，比如，用一个 3 dB 耦合器分成两束流。如果第 j 条流需要从复用流中提取，则该数据流将被延迟 $j\tau$ 时间。用阈值方法从延迟流中提取出成帧脉冲。为了便于利用该阈值方法，在复用时成帧脉冲的功率电平比其他脉冲功率电平高。请注意，由于引起了时延，提取后的成帧脉冲与相应的无时延的数据流一起被解复用。在成帧脉冲流与复用的脉冲流之间进行逻辑与门运作可用来提取第 j 条数据流。如果在一个脉冲期间，两路输入信号都存在脉冲信号，则逻辑与门就输出一个脉冲，否则就没有脉冲输出。将在 9.1.3 节中讨论用两种器件——非线性光环镜和孤子俘获门——来实现逻辑与门的运作。

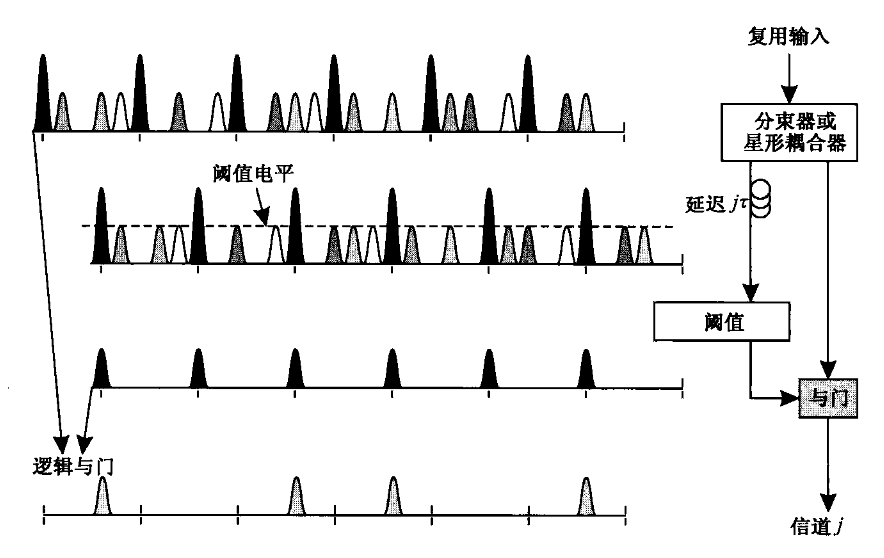


图 9.6　从比特间插 TDM 流中提取复用信道之一的一种光解复用器(见第 3 章后参考文献[Mid93])

9.1.2　包间插

接下来，考虑如何实现图 9.4(b)所示的包间插操作。这一操作过程如图 9.7(a)所示。如比特间插情况那样，一条窄脉冲周期流被数据流外部调制。如果比特间隔为 T，那么相邻脉冲之间的时间间隔也是 T。必须设法制订一个方案将相邻脉冲之间的时间间隔缩短到 τ，使之对应于较高比特率的复用信号。将经外部调制器调制的输出脉冲通过系列的压缩级，可以实现这一压缩。如果每个数据包的长度是 l 比特，输出通过 $k=\lceil \log_2 l \rceil$ 级压缩。在第一级压缩中，第 1, 3, 5, 7,… 比特被延迟了 $T-\tau$ 时间。在第二级压缩中，比特对(1, 2)、(5, 6)、(9, 10)、… 被延迟了 $2(T-\tau)$ 时间。在第三级压缩中，比特(1, 2, 3, 4)、(9, 10, 11, 12)… 被压缩了 $4(T-\tau)$ 时间。第 j 级压缩如图 9.7(b)所示。每个压缩级由一对 3 dB 耦合器、2 个用做通断开关的半导体光放大器(SOA)和一段延迟线组成。第 j 压缩级含有延迟时间为 $2^{j-1}(T-\tau)$ 的延迟线。下面这个推导留下作为习题(习题 9.1)：证明脉冲 i，$i=1, 2, \cdots, l$ 经过第 k 级压缩后所产生的时间延迟是 $(2^k-i)(T-\tau)$。考虑到输入脉冲之间时间间隔为 T，这意味着在 $(2^k-1)(T-\tau)+(i-1)\tau$ 时刻输出脉冲 i。这样，输出脉冲之间的时间间隔为 τ。

解复用操作相当于“解压缩”数据包。原则上，与图 9.7(b)所示的压缩级类似，可以将压缩包通过一组解压缩级来实现。这种方法再在习题 9.2 中讨论。此外，所需解压缩级数是

$k = \log\lceil l \rceil$，其中 l 是以比特为单位的数据包长度。然而，这种方法所需的通断开关必须具有脉冲宽度 τ 量级的开关时间，因此这样小的 τ 值使这种方法不太切合现实，这也是光分组交换网络所关心的问题。

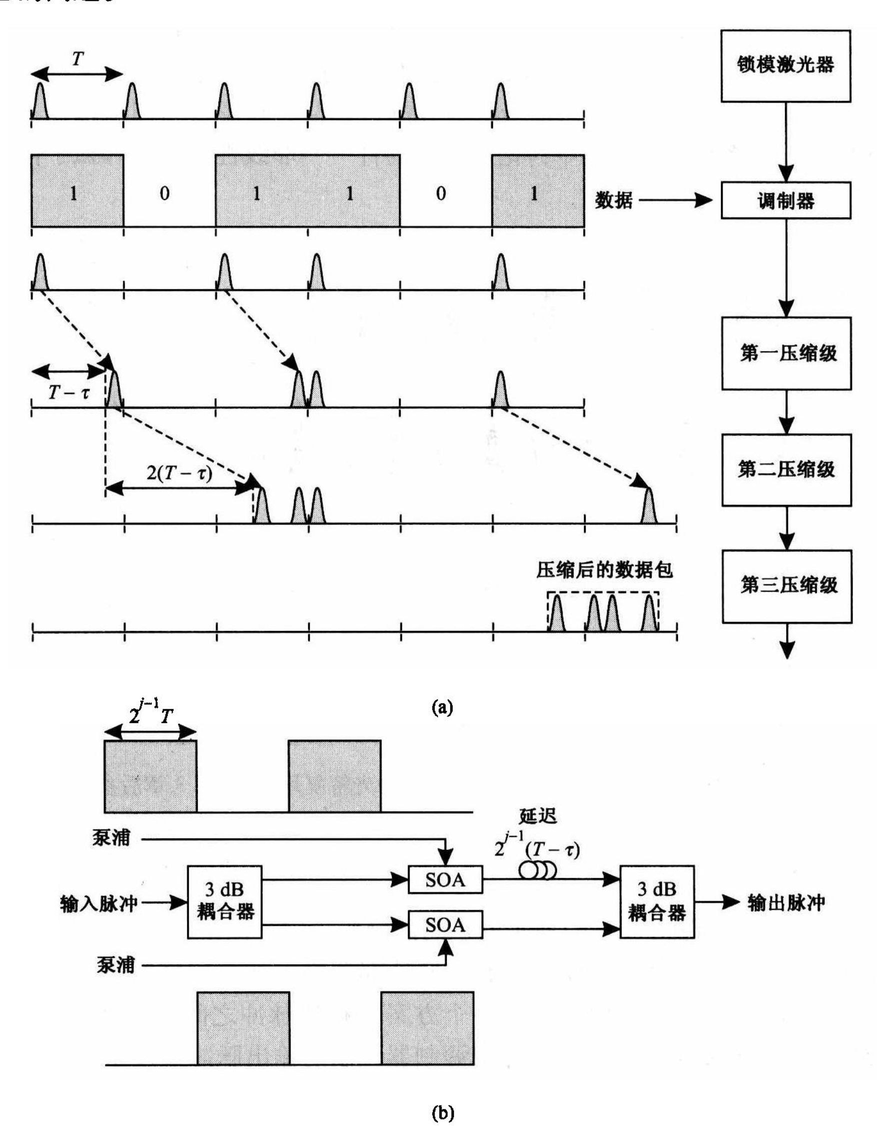


图 9.7　一个生成包间插 TDM 流的光复用器。(a)数据包经过 k 级压缩，其中 2^k 是不小于数据包长度 l（以比特为单位）的2的最小次幂；(b)有关第 j 级压缩的详细考虑（见本章的参考文献[SBP96]）

一个更实际的方法是使用一排与门(AND)，如图 9.6 中所使用的那样，并将单条(串行)高比特率数据流转换成多条(并行)较低比特率的数据流，这样就可以在电域进行处理。该方法如图 9.8 所示。在该图中，5 个一排的与门被用来将输入的高速比特率流分成 5 条并行的流，每一流的脉冲间隔是原复用流的 5 倍。这个过程与用于接收 5 条比特间插的数据流的过程是相同的。每个与门的一个输入端是来自输入数据流，而另外一个输入端是控制脉冲流，控制脉冲间间隔是数据流的 5 倍。输入到每个与门的控制脉冲流相互之间存在适当的偏离，

以便于选择不同的脉冲。因此，第一条并行的流将包含数据包的第 1 位、第 6 位、第 11 位、…。第二条并行的流，将包含数据包的第 2 位、第 7 位、第 12 位、…。这种方法也可用于解复用光分组交换网中数据包的一部分，如信头等。这个问题将在 9.3 节中进一步讨论。

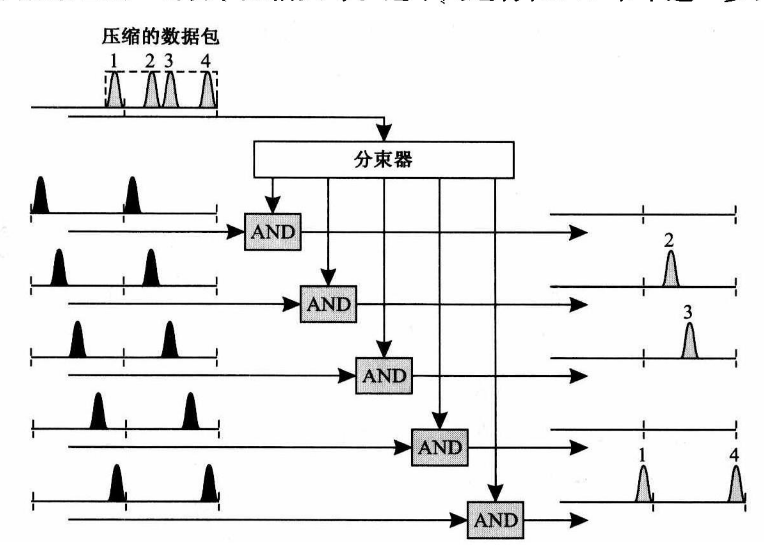


图 9.8　从包间插 TDM 流的复用信道中提取某一信道的光解复用器

9.1.3　光与门

图 9.6 和图 9.8 所示的逻辑与门的运行是以很高的速度在光域完成的。为此，已经提出了一些可实现光逻辑与门的机制。现在描述其中两种。请注意，两个信号之间的逻辑与门运行是通过通断开关来实现的，如果其中一个信号被输入到开关，而另一个信号用以控制。这种看法在下面的讨论中将是有用的。

非线性光纤环镜(NOLM)

非线性光纤环镜(NOLM)由一个 3 dB 定向耦合器、一个连接耦合器两输出端的光纤环和一个位于光纤环中非对称位置处的非线性元件(NLE)组成，如图 9.9(a)所示。首先，不考虑非线性元件，并假设一个信号(脉冲)输入至耦合器的一个端口，如图 9.9(a)中定向耦合器的端口 A。这样，分成两路的输出信号是相等的，穿越光纤环后产生完全相同的相移。(请注意，这里所说的相移是指光载波的相移，而不是指脉冲的延迟)。在习题 2.1 中已经看到，在这种情况下，光纤环中顺时针和逆时针方向的信号都完全反射到端口 A 输出，特别是，图 9.9(a)中端口 B 无任何脉冲输出。因此，对这种配置起了一个名称叫光纤环镜。然而，如果其中一个信号与另一个信号相比经历了不同的相移，则输出脉冲可从图 9.9(a)的端口 B 输出。这个问题留下作为一个习题，证明当这个相位差为 π 时，所有的能量将从端口 B 输出(见习题 9.4)。

在许多早期的用 NOLM 作为开关的实验中，还没有利用单独的 NLE 元件，而是利用石英光纤本身非线性所产生的随信号强度变化而引起的相位变化(或折射率变化)。附录 E 中公式 $\hat{n}(E)=n+\bar{n}I$ 描述了这种折射率随信号强度而变化的现象，在孤子脉冲情况下，就是这种非线性抵消了群速度色散效应。这种结构的一个例子如图 9.9(b)所示，定向耦合器输出后沿光纤环顺时针传输的脉冲就被掺铒光纤放大器放大了。由于光纤环中使用了一个光放大

器，这种结构称为非线性光放大环镜(NALM)。放大后的脉冲具有较高的强度，经过该光纤环后，与没有经过放大的脉冲相比产生了一个较大的相移。

然而，这些采用 NOLM 作为高速解复用器的结构在使用上并不方便。首先，石英光纤中相位随光强度而变化是一种弱非线性，要起到脉冲开关的效果通常需要几百米长的光纤。使用较短长度的光纤产生非线性效果才是可取的结果。其次，要实现一个与门，需要一个非线性特性可以很方便地受控制脉冲控制的 NLE。图 9.10 所示的结构同时具有这两种属性，称为太赫兹光非对称解复用器(TOAD)。

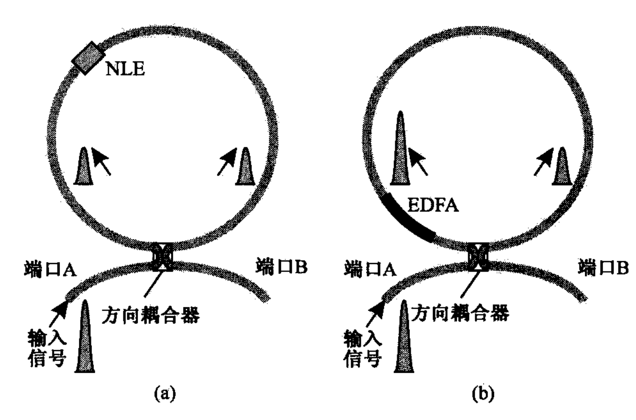


图 9.9 (a)非线性光纤环镜；(b)非线性光放大环镜

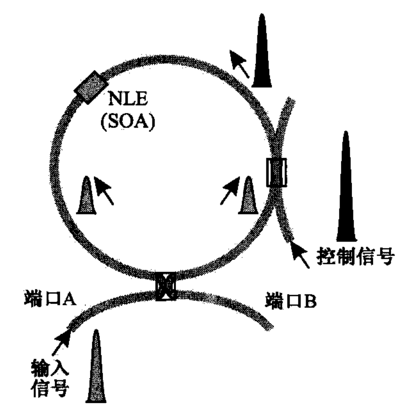


图 9.10 太赫兹光非对称解复用器

TOAD 的工作原理如下。TOAD 使用另一个定向耦合器将控制脉冲注入光纤环。控制脉冲具有足够高的功率和能量，使它在通过 NLE 时，NLE 的光学特性在非常短的时间间隔内得到明显改变。特别是如果在此期间另一脉冲通过 NLE 时，脉冲载波所经历的相移将得以改变。一种适合于这种情况下使用的 NLE 器件的例子是半导体光放大器(SOA)，控制脉冲将使 SOA 进入饱和状态。TOAD 作为一个解复用器，控制脉冲和信号脉冲之间的定时是至关重要的。假设 NLE 的位置使顺时针方向的信号脉冲首先到达，则控制脉冲必须在顺时针信号脉冲到达 NLE 后、逆时针信号脉冲到达 NLE 前通过 NLE。如果正好发生这种情况，则顺时针方向的信号脉冲将经过处于不饱和增益状态的放大器，而逆时针方向的脉冲正好经过处于饱和增益的放大器。后者由于放大器增益饱和而产生了一个附加相移。由于这种不对称的结构，该信号脉冲的两部分相互之间不会完全产生相消干涉，一部分信号脉冲将从输入耦合器的端口 B 输出。

注意，控制脉冲也将随信号脉冲一起输出。信号脉冲和控制脉冲可以采用不同波长的载波并在输出端放置一个光滤波器，只选择信号脉冲输出而滤除控制脉冲。但这两种波长都必须处于 SOA 的光带宽之内。另一种方法是让信号脉冲和控制脉冲相互处于正交偏振状态，并据此区别两个脉冲。无论这种方法是否使用，在光纤环内传输时信号脉冲的偏振态必须保持不变；否则，进入光纤环的信号脉冲的两部分在通过光纤环后在定向耦合器将不会以所期望的方式产生干涉。TOAD 的另一个优点是，由于光纤环的长度短，即使使用标准单模光纤(非保偏光纤)，脉冲的偏振态也可以保持不变。如果光纤环的光纤很长，则它必须使用保偏光纤。

孤子俘获与门

孤子俘获与门(soliton-trapping AND gate)使用了孤子脉冲在双折射光纤中传播时的一些属性。在标准光纤中，两个正交偏振的简并模有相同的群速度。在双折射光纤中，这两种模

有不同的群速度。因此，如果波长相同，但处于正交偏振态的两个脉冲由于具有不同的群速度，则它们在双折射光纤中传输时将走离，或在时间上散开。

然而，孤子脉冲是这种走离现象的一个例外。正如孤子脉冲在非双折射石英光纤中传播时，没有因群速度色散而引起的脉冲展宽一样，一对正交偏振的孤子脉冲在双折射光纤中传播将不会走离。这种现象的定量分析已经超出了本书的范围，但定性分析可以看到，两个脉冲在相反的方向上产生波长偏移，正是由于这种波长漂移引起的群速度差精确地补偿了因双折射而产生的群速度差！由于两个孤子脉冲总在一起传输(它不会走离)，这种现象称为孤子捕获。

如果这两个脉冲流对应于正交偏振孤子脉冲，则两个脉冲流之间的逻辑与门操作可以利用上述现象实现。大多数高比特率 TDM 系统利用孤子脉冲使群速度色散的影响最小，以至于孤子脉冲形状的要求是没有问题的。两个脉冲流的正交偏振态可以适当利用偏光片来实现(见2.2.1节)。逻辑与操作可以通过在双折射光纤输出端使用光滤波器来实现。

图9.11是孤子俘获与门的方框图。它由一段双折射光纤和紧随的一个光滤波器组成。图9.12说明了该与门的运作过程。两个偏振脉冲的波长是λ，其中一个波长漂移到$\lambda+\delta\lambda$，另一个波长漂移到$\lambda-\delta\lambda$。选择滤波器使它通过$\lambda+\delta\lambda$波长的信号，而不让λ波长的信号通过。因此，选择滤波器使波长漂移后的脉冲处于其通带之内。但在同样的脉冲情况下，如果它的波长不发生变化，则将不能通过滤波器。因此，只有当两个脉冲同时输入时，滤波器输出一个脉冲(逻辑“1”)，否则没有脉冲输出(逻辑“0”)。

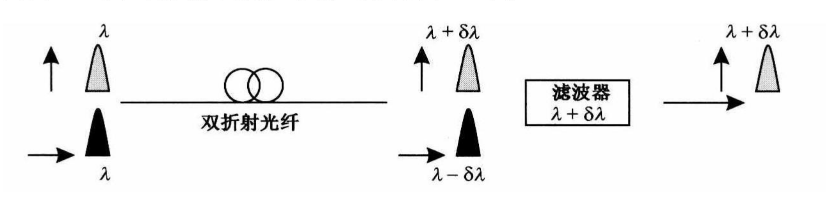


图9.11　孤子俘获与门的方框图

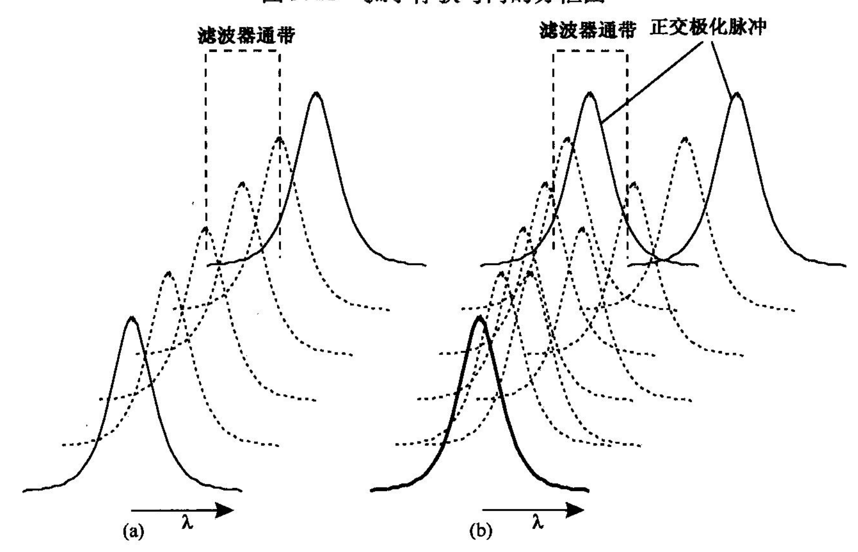


图9.12　孤子俘获与门的原理图。(a)只有一个脉冲，并且只有很少的能量能通过滤波器输出，此状态对应逻辑“0”；(b)输入两个脉冲，由于孤子俘获现象产生了波长变化，一个脉冲的大部分能量从滤波器输出，此状态对应于逻辑“1”

9.2 同步

同步是调整两个脉冲流在时间上对齐的过程。在 PPS 网络中，它可以指将一条输入脉冲流与一条本地可用的时钟脉冲流对齐，或将两个输入脉冲流相互对齐。回顾一下数据包的长度是固定的假设。因此，如果成帧脉冲用来标记数据包的边界，则成帧脉冲必须周期性产生。

从图 9.13 中可以了解同步装置的原理。如图 9.13(a)所示，两条周期为 T 的周期性脉冲流由于上面那条流超前了时间 ΔT 而不同步。图 9.13(b)中的两条脉冲流是同步的。因此，要实现同步，上面那条流必须相对于下面那条流延迟时间 ΔT。至今，已经考虑的延迟，如在研究光复用器及解复用器时的延迟，是固定的延迟。使用适当长度的光纤可以实现一个固定的延迟。然而，在同步器的情况下及在光分组交换网络中的一些应用，都需要一个可调延迟元件，因为将引入的延迟量事先是不知道的。因此，现在将研究如何实现可调谐光延迟。

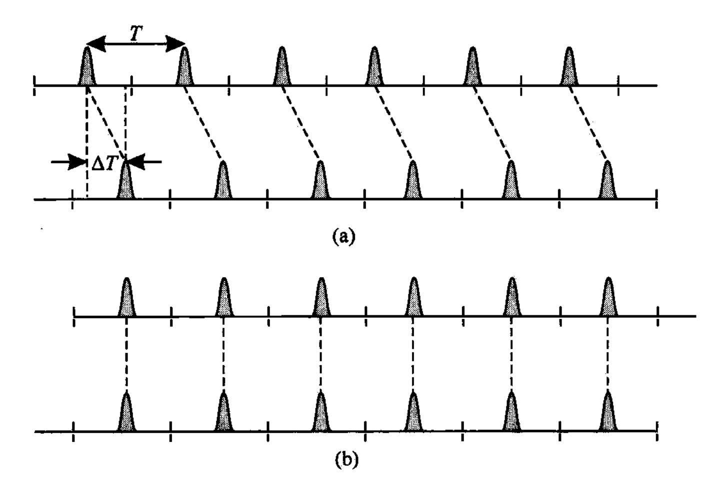


图 9.13 同步器的功能。(a)两个周期为 T 的周期性脉冲流不同步，上面那条流超前时间 ΔT；(b)由于上面那条流相对于下面那条流引入了时间延迟 ΔT，因此两条周期性流已经同步

9.2.1 可调延迟

图 9.14 所示的一个可调光延迟线能够实现超过参照延迟时间从 0 到 $T - T/2^{k-1}$ 的任何时间延迟，每级延迟步幅为 $T/2^{k-1}$。参数 k 控制可实现的延迟分辨率。延迟线由 $k-1$ 个固定延迟时间单元组成，它们的延迟分别为 $T/2$，$T/4$，…，$T/2^{k-1}$，并用 k 个 2×2 光开关连接，如图所示。适当设置开关为直通状态或交叉状态，输入脉冲流可以通过或旁路这些固定延迟单元。如果通过所有固定延迟单元，则输入脉冲流所经受的总延迟时间为 $T/2 + T/4 + \cdots + T/2^{k-1} = T - T/2^{k-1}$。这种结构可看成由 $k-1$ 级延迟单元和随后的一个输出开关组成，如图 9.14 所示。这个输出开关用来确保输出脉冲流始终从这个开关的同一端口输出。对 k 个开关的控制输入 $c_1, c_2, \cdots, c_k$ 的推导在习题 9.3 中讨论。

使用如图 9.14 所示的可调延迟线，可以实现两个脉冲流在 $T/2^k$ 的时间间隔内同步。k 值，也是固定延迟和光开关的数量，必须选择使 $2^{-k}T$ 远小于脉冲宽度 τ。延迟线的分辨率由

所选用开关的速度和延迟线能实现的精度决定。实际上，这种方法的分辨率可能在 1 ns 左右。可以使用这种方法来实现粗同步。还需要精细同步，以将比特位对齐到比特间隔一小部分。一种方法是用一个可调谐波长转换器后接一段高色散光纤线[Bur94]。如果 D 表示所用光纤的色散，$\Delta\lambda$ 表示输出波长范围，L 表示光纤的长度，那么可以得到一个 0 到 $D\Delta\lambda L$ 的相对延迟变化。如果输出波长能够分段控制到间隔 $\delta\lambda$ 内，则延迟分辨率就是 $D\delta\lambda L$。

如果给定一个可调的延迟装置，则同步问题就简化到确定两个脉冲流之间的相对延迟或相位。处理这个问题的一种简单直接的方法是将一条流的各种延迟量与另一条流进行比较。这个比较可以借助逻辑与门运算来实现。但这种方法成本稍微有些昂贵。另一种方法是使用光学锁相环来检测两个脉冲流之间的相对延迟。正如可以利用不止一种现象构建光学与门那样，利用不同的原理也可以构建光学锁相环。下面将讨论一种这样的机制，它是基于 9.1.3 节中研究过的 NOLM 而实现的。

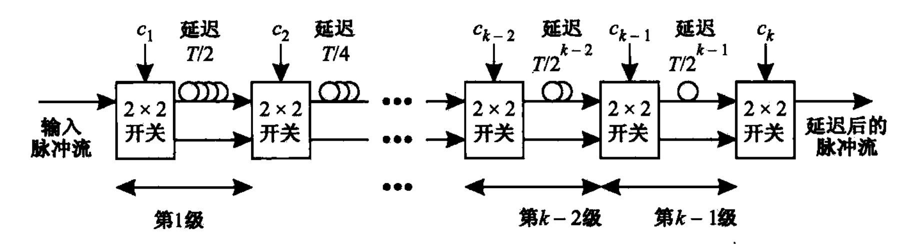


图 9.14　一个可调延迟线，能实现从 0 到 $T-T/2^{k-1}$ 的时间延迟，每级步幅为 $T/2^{k-1}$

9.2.2 光锁相环

考虑一个 NOLM，它不使用单独的非线性元件，而是利用石英光纤本身折射率随光强产生的变化作为非线性。因此，如果一条低功率脉冲流，如脉冲流 1，从图 9.9(a)所示的定向耦合器端口 A 注入光纤环，这时光纤的非线性没有被激发，沿顺时针方向传播的脉冲流和沿逆时针方向传播的脉冲流在经历光纤环后产生相同的相移。因此，在这种情况下，没有任何功率从端口 B 输出。如果另一条高功率脉冲流，如脉冲流 2，与顺时针方向传播的脉冲流同时(无相对延迟)注入，由于石英光纤的折射率随光强变化，这时顺时针方向的脉冲流与逆时针方向脉冲流相当于在不同折射率光纤中传输，因此它们会产生不同的相移。这种相移失配会导致图 9.9(a)中的端口 B 有光功率输出。注意，如果高功率脉冲流不与顺时针方向传播的脉冲流同时(有非零的相对延迟)注入，顺时针和逆时针方向的脉冲就会产生相同的相移，定向耦合器的端口 B 就没有功率输出。为了达到脉冲流 1 和脉冲流 2 之间的同步，可调延迟装置可以用来调整它们之间的相对延迟，直到流 1 的功率不再从 NOLM 输出。

请注意，在方向耦合器输出端口(端口 B)同样存在辨别脉冲流 1 和脉冲流 2 的问题，与 TOAD 在这种情况下产生的问题一样。由于脉冲流 2 始终在输出端输出，为了检测出来自脉冲流 1 中的脉冲，这两条数据流必须利用不同的波长或偏振。当使用不同波长时，由于光纤存在色散，两个脉冲往往会彼此走离，并且非线性(随强度变化的折射率)的影响将会减小。为了克服这种影响，可以选择处于光纤零色散波长两侧对称的两个波长，以使两个脉冲流的群速度相等。

锁相环也可以用来调整本地时钟源——锁模激光器——的频率和相位与输入周期流的频

率和相位一致。在2.5.1节中已经看到，锁模激光器的重复速率或频率由调制激光器谐振腔的增益决定。假设其增益介质的调制频率，即脉冲的重复速率，是受电振荡器的频率控制的。因此，NOLM的输出可以被光检测出并用来控制电振荡器的频率和相位，以使本地锁模激光产生的脉冲与输入脉冲流有相同的频率和相位。对此，可参考文献[Bar96]和参考文献中的细节。

同步的另一项功能是提取时钟，以读取数据包的部分内容，如信头，或用以解复用数据流。可以使用光锁相环来实现该项功能。但也可以将时钟随数据包中的数据一起发送来实现这项功能。在文献[BFP93]所示的例子中，时钟在数据包起始端发送。在交换节点中，用一个开关将时钟信号与该数据包其余部分分离，以便在一个预先设定的、相应于时钟信号的持续时间内读取输入数据流数据包。然后，可以使用这个时钟要么读取数据包中部分内容，要么解复用数据流。

9.3 信头处理

对于一个固定长度的信头，解复用和处理该信头所需时间也是固定的，用一个适当长度的延迟线光缓冲数据包中的其余部分。信头比特处理在电域还是在光域，取决于开关所需的控制输入类型。利用电光效应和铌酸锂材料制作的电控开关(见2.7节)，是当今最常用于交换网络实验的器件。在这种情况下，信头处理可以在电域完成(在信头比特解复用至并行流后进行)。信头中的数据包宿节点信息被用来通过查表为该数据包确定从开关出来后的输出链路。对于每一输入的数据包，通过查表确定正确的开关设置，使数据包被路由到正确的输出端。当然，如果多路输入都有数据包欲同时输出到同一输出端口，则会导致冲突。这是路由节点中需要有缓存的原因之一，我们将在下面解释。

如果数据包信头中携带了目的地址，可以用一排与门，如图9.8中所示的TOAD那样，解复用信头比特位，读取其中的目的地址。然而，这种读取信头方式相对比较昂贵，而在电域处理就比在光域更容易实现。在电域实现此一功能的另一个原因是，所需的路由和转发功能可能相当复杂，涉及先进的控制算法和查表技术。

考虑到这一点，已提出几种技术，用以简化对信头的识别。一种常用的方法是让信头的传输比特率比数据包本身低得多，便于在路由节点中相对容易地接收和处理信头。也可以用与数据包数据不同的波长传输分组包的信头。此外，它也可以用同一波长，但在不同的副载波信道上传输。所有这些方法都允许数据包中信头的比特率比高速数据低，从而更容易实现信头处理。然而,鉴于涉及高净荷速率，为了保持合理的带宽利用率，不使数据包的长度长得不合理，我们将使用较短的信头，并将其快速处理。这可能没有给先进的信头处理留下更多的余地。这个问题作为一个例子见习题9.5。

9.4 缓存

一般情况下，路由节点包含缓存器，以存储来自输入链路的、但尚未能传输或转发到输出链路的数据包，因此这些网络称为存储转发网络。在常规的存储转发网络中，电缓存器或光缓存器可以只配置在输入端，或只配置在输出端，或在输入端和输出端两端都配置，如

图9.2所示。缓存器也可能以随机存取存储器的形式集成在开关内，并与所有端口共享。该种结构经常用于电网络中，其中的存储器和开关结构都制作在同一基片上，比如，制作在硅集成电路上，但这种方法不适合于光分组交换。由于相关网络性能的原因，大多数光交换协议并不建议使用输入缓存。

至少有三个原因说明数据包在其转发至输出链路前不得不被存储或缓存。首先，当处理数据包的信头以确定该数据包如何路由时，输入数据包必须缓存。通常，这是一段固定的延迟时间，可以用一个简单的方式实现。第二，所需开关的输入和/或输出端口可能不是空闲的，导致数据包在其输入缓存区排队。开关输入端可能不空闲是因为在同一链路上的其他数据包已较早送达。开关的输出端口可能不空闲是因为从其他输入端口的数据包也可能要交换到这一输出端口。第三，数据包已交换到所需输出端口后，该端口的输出链路可能要忙于其他数据包的传输，从而使该数据包依次等待。后者的延迟是可变的，需要用处理信头所需的与固定延迟不同的方式来执行。

缺乏好的光缓存方法是一个主要的障碍。与电域不同，我们没有光随机存取存储器。相反，实现光缓冲器的唯一方法是使用光纤延迟线，它由相对较长的光纤组成。例如，1 μs的延迟约需200 m长的光纤，这足以存储10个数据包，每个数据包在10 Gb/s比特率下是1000比特。因此，在光分组交换网中通常使用非常小的缓存器。注意，与电缓存器不同的是，一个数据包不能在任意时刻存取；它只能在进入缓存区后一个固定的时间间隔后才可以退出。这是数据包传输这段光纤所需的时间。这个限制条件必须纳入PPS网络的设计中去。当然，反复通过同一段光纤，可使数据包延迟时间数倍于这个基本延迟时间。

PPS网络通常使用两种结构延迟线中的一种。图9.15显示了一种前馈结构的延迟线的例子。在这种构造中，一个两端口输入、两端口输出的路由节点由两段延迟线连接三个2×2开关组成。如果每段延迟线可以存储一个数据包——通过该延迟线的传播时间等于一个时隙——则该路由节点具有两个数据包的缓存能力。如果同时到达两个输入端口且目标为同一输出端口的数据包，则一个数据包将被路由到应到的输出端口，而另一个数据包将存储在延迟线1中。这可以通过设置开关1到适当的状态来实现。然后，这个数据包有机会在随后的时隙，中被路由到其所需的输出端口。例如，在下一个时隙，如果没有数据包到达，这个存储的数据包可以通过适当设置开关2和开关3被路由到其所要去的输出端口。

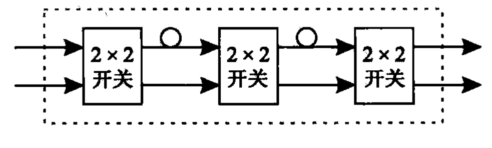


图9.15 一个使用前馈延迟线结构的2×2路由节点范例

另一种结构是反馈结构，其中延迟线将开关的输出端返回连接到其输入端。9.4.3节中将会研究这种结构。

对于在光交换中存在的竞争问题，提出了几种解决方法。第一种方法是在光开关中提供足够的缓存，以处理这些竞争。为了达到合理的丢包率，缓存区需要能够容纳几百个数据包。这绝不是光缓存器研究中一项简单的任务。

另一种方法是每当产生竞争时丢弃一些数据包。这不是一个有吸引力的选择，因为这样的情况将会频繁发生，除非链路中只传输与它们的容量相比极为少量的数据包。数据包丢弃以后，信源必须重新发送数据包，造成有效链路利用率的下降甚至更低。

第三种方法是使用多波长，以助于解决冲突。这可以显著减少所需的缓存数量。

最后一种方法是通过开关使数据包误路由，即通过开关将数据包传输至不正确的输出端。此种方法称为偏射路由，在研究 PPS 网络的文献中，已有相当多的有关偏射路由方面的研究文章。

下面从描述各种类型的缓存开始，再讨论利用多波长解决冲突的方法，随后是偏射路由。在下面一节中列举的一些开关结构是理想化的方法，仅仅用于说明原理。在 9.6 节中将看到一些实际的建议和实验配置。

9.4.1 输出缓存

考虑图 9.16 所示的带输出缓冲的开关。假定将时间分为时隙，并将进入开关的数据包与这些时隙对齐。在每个时隙中，有数据包到达输入端口。这些数据包中可能有一个或多个被交换至同一个输出端口。在最坏的情况下，到达每个输入端的数据包的目标地址甚至都指向同一个输出端口。在这种情况下，如果开关被设计成在 N 倍线路速率(N 为端口数量)下运行，那么这些数据包都可以被交换到输出端口。然而，这些数据包中只有一个可以在该时隙中传送出去，其他的数据包将不得不存储在输出缓存器中。如果输出缓存器已满，则数据包将被迫丢弃。丢包率表示数据包被开关丢弃的频繁程度。对于每次这样的丢包事件，信源必须重新发送数据包，造成有效链路利用率甚至进一步下降。可以通过增加缓存器的数量最大限度地降低数据的丢包率。如果有足够大的输出缓存器，则这种带输出缓存的开关与其他交换结构相比，在数据包的延迟和吞吐量等性能方面都可能有最佳性能。吞吐量可以被看成数据包通过开关时延迟变得非常大(趋于无穷大)时所提供的负载的渐近值。

可以用一个简单的模型来了解不同的缓存技术的性能。该模型假定在每一时隙中在输入端接收到数据包的概率为 ρ。因此，ρ 表示流量负载。进一步假设流量是均匀分布的，并且数据包被指定交换至一个特定的输出端口的概率为 $1/N$，其中 N 是在开关上的端口数。虽然这不是一个很现实的模型，但它让我们理解了一些不同缓存方法之间的权衡。感兴趣的参数是所需数据包的丢失率、所需数据包缓存器的数量和流量负载。该模型所建议的数据包缓存器的数量通常比实际所需的数量更少，因为现实流量比这个模型假设的流量更具突发性。

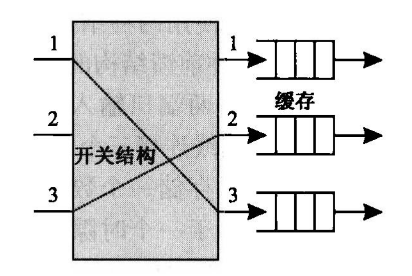


图 9.16 一个带输出缓存器的普通开关

文献[HK88]中，在带输出缓存的开关的情况下，对这个简单的模型进行了分析，分析表明为了在流量负载为 0.8 的情况下得到 10^{-6} 的丢包率，每个输出端口大约需要 25 个数据包缓存器。如果有足够多的缓存器，吞吐量也可以接近于 1。

与输出缓存开关相关的一个问题是，这一开关需要运行在 N 倍于每个端口的线路速率上。也就是说，它需要在每时隙将 N 个来自不同的输入端的数据包切换至同一输出端。用光开关是非常难以实现这一操作的。出于这个原因，许多光交换协议仍然在每个端口的线路速率下运行时模拟输出缓冲开关。如果在一个时隙内到达的多个数据包的目标都是朝向同一个输出端口，在输入端交换设备会为每个输入的数据包安排不同的时间延迟，使它们在随后的不同时隙段交换到这个输出端。例如，开关立即处理第一个数据包，在输入端将第二个数据包延迟一个时隙，再将第三个数据包延迟两个时隙，等等。

9.4.2 输入缓存

一个有输入缓存的开关就是在开关输入端有缓存，而输出端没有缓存。这些开关由于存在所谓的线端(HOL)阻塞现象而具有相对较差的吞吐量，如图9.17所示。当在线端有多个输入数据包的目标都是同一输出端时，只有一个数据包可以被交换通过开关。然而，其他数据包可能会阻止它们后面的包在同一时隙交换数据包。例如，在图9.17中，端口1和端口2中排在最前面的数据包目标都是端口3。比如，将端口1的数据包交换到端口3，则端口2中排在线端数据包后面的第二个数据包的目标虽然是输出端口1，但由于线端数据包的阻挡不能进行交换，即使输出端1现在是空闲的。对于前面考虑过的流量模型，这种HOL阻塞将大型交换规模中可实现的吞吐量降低到0.58[HK88]。虽然可以通过选择其他数据包而不仅仅是选择线端数据包的方法来改善吞吐量，但这是相当复杂的问题，在光交换的情况下是不可行的。另一个问题是将数据包放置入缓存器之前，无法确定在输入缓存器中的数据包的延迟时间，因为这段延迟时间还取决于其他输入端。在光延迟线的情况下，这意味着当数据包退出延迟线时，还不能将该包交换至其所需的输出端口，因为这个端口还可能处于繁忙状态。基于这些原因，只使用带输入缓存器的光开关不是一种好的选择。

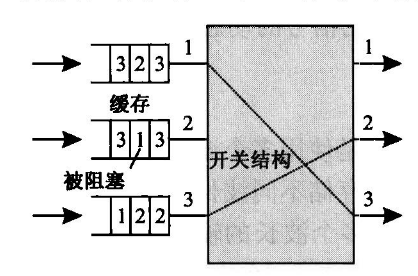


图9.17　输入缓冲开关中的线端堵塞。观察到输入缓存器2中目标是输出端1的数据包被堵塞，尽管实际上这个输出端是空闲的

9.4.3 循环缓存

在这种方法中，缓存器将输出端反向连接到输入端。通常情况下，一些开关端口只保留给缓存，并且这些端口的输出端经过缓存器反向连接至相应的输入端。如果目标指向一个共同的输出端口的多个数据包同时到达，其中之一就交换到这一输出端口，同时其他数据包被交换至循环缓存器。

在光交换的情况下，缓存是通过反馈延迟线来实现的。在图9.18所示的反馈结构中，延迟线将开关的输出端连接到该开关的输入端。开关结构内部是一个4×4开关，其中有2个输入端各连接1条延迟线，还有2个连接外部的输入端。同样，如果两个数据包竞争同一输出端口，其中之一可以存储在延迟线中。如果延迟线的长度等于一个时隙，存储后的数据包就有机会在下一个时隙时路由至其所需的输出端口。如果再发生竞争，则该数据包或欲竞争的数据包可在另一时隙存储在延迟线中。

循环缓存比输出缓存能更有效地解决竞争，因为在这种情况下缓存器是供所有输出端共享的，而不是每个输出端各有单独的缓存器。由于需要额外的交换机端口连接循环缓存器，在这种情况下需要折中考虑采用较大的开关规模。例如，文献[HK88]表明为了在负载0.8的情况

下达到10^{-6}丢包率，一个16×16开关共需要112个循环缓存，或每个输出端口约需要7个缓存器。相比之下，对于在前面所看到的输出缓冲开关，每个输出端口约需要25个缓存器，或者说，总共需要400个缓存器才能达到相同的数据丢包率。

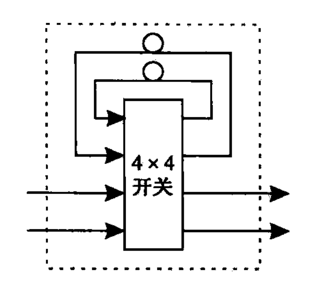


图9.18 使用反馈延迟线结构的一个2×2路由节点示例

在前面考虑过的前馈结构中，每个数据包都有固定数量的机会到达其所需的输出端口。例如，在图9.15所示的路由节点中，数据包最多有三个机会被路由到正确的目的端口:在其抵达的时隙和下面两个紧接着的时隙。另一方面，在反馈结构中，数据包看来可以无限期存储。但在实际中这是不可能的，因为光开关有几分贝的损耗。虽然损耗可利用放大器补偿，但随后必须考虑数据包多次通过延迟线所累积的放大器噪声。开关串话也会被积累。因此，同一数据包不能多次通过开关路由。在实际中，前馈结构优于反馈结构，因为不管节点经历什么路径通过路由，它对信号的衰减几乎是相同的。这是因为几乎所有的损耗都是通过开关时产生的，并且在这个结构中每一数据包通过了相同数量的开关而与它所经历的延迟无关。在网络中，这种低的差分损耗特性是非常重要的，因为它减小了所需处理的信号的动态范围。

9.4.4 利用波长解决竞争

减少所需缓冲数量的方法之一是使用多个波长。在PPS的情况下，缓存器相应于光纤延迟线。观察到在同一延迟线中可以存储不同波长的多个数据包。

从寻找使用延迟线，而不使用多个波长的输出缓冲开关的基本结构开始。图9.19显示了这样一种实施方法，该方法相当于图9.16中所示的输出缓存开关，其中每个输出端口有B个缓存器。通过使用每个输出端口的一组B个延迟线，可为每个输出端口提供多达B段延迟时隙。T表示一段时隙的持续时间。如果有多个输入数据包在同一时隙到达并且目标都是同一输出端口，则其中数据包之一可以交换输出，而其他数据包则被分别延迟不同的时间，并被存储在不同的延迟线中，这样使输出竞争得以解决。请注意，这组延迟线合在一起可以同时存储不止B个数据包。例如，一个有K个时隙的延迟线可以同时放入K个数据包。因此，图9.19中的一组延迟线可以放入总数为$1+2+\cdots+B=B(B+1)/2$个数据包。然而，因为每段时隙只有一个数据包可以被传输出去(或B段时隙总共只能传输B个数据包)，所以该组延迟线的有效存储容量只是B个数据包。

在最简单的形式中，可以在开关结构内部使用波长，以减少所需延迟线的数量。图9.20显示了一个这样的输出缓存开关的例子[ZT98]。不是在每个输出端口都采用一组延迟线，而是这些延迟线在所有的输出端口共享。进入开关的数据包被送往一个可调谐波长转换器。在开关结构的输出端，数据包被送往一个阵列波导光栅(AWG)。由可调谐波长转换器所选定的波长，以及数据包将要经历的输出开关结构端口，共同确定一条延迟线，由AWG将该数据包路由至这条延迟线。

图2.25描述了在此结构中AWG的工作原理。例如，考虑AWG的第一个输入端口。波长λ_1从该端口被路由至延迟线0，波长λ_2被路由到单时隙延迟线，波长λ_3被路由至双时隙延迟线，波长λ_B被路由至B个时隙段延迟线。为了让AWG每一输入端的数据包被路由到每一

可能的延迟线，所需的波长数量为 $W=\max(N,B)$，其中 N 是输入端口数。因此，一个数据包所需的延迟可以通过控制可调谐波长转换装置输出端的波长来实现。在这种情况下，如果有从不同端口输入而目标是同一输出端口的两个数据包，则可这样选择它们的波长，使其中之一产生延迟，而另一个直接交换通过。从缓存的角度来看，这种结构相当于图 9.19 中的基准配置。值得注意的是，TWC 必须配置在开关结构的输入端(而不在输出端)，因为可能几个数据包会以不同波长的形式在同一个时隙离开开关结构输出端口。

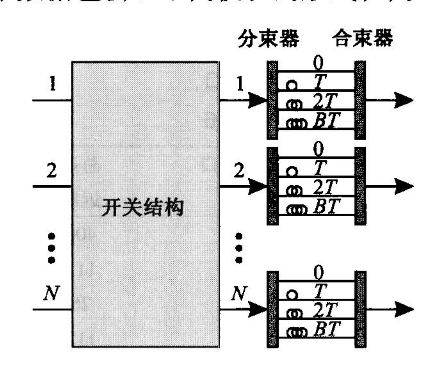


图 9.19　不使用波长方法而使用光纤延迟线作为缓存器来解决竞争的一个输出缓冲光开关的例子

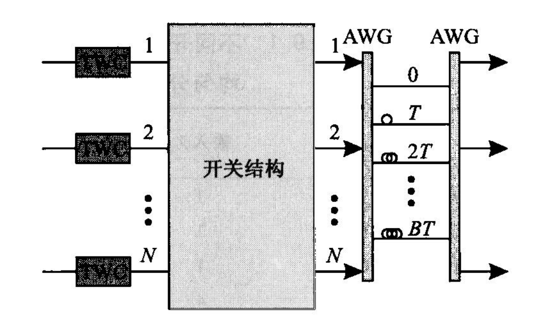


图 9.20　使用开关内部的多个波长和光纤延迟线作为缓存器的一个输出缓存光开关的例子。该光开关使用了可调谐波长转换器和阵列波导光栅

例如，在一种路由方法中，被限制到输出端口 j 的数据包将路由到开关结构的输出端口 j。它的波长依据所需延迟时间来选择。依据上述性能假定的 AWG 设计，目标为输出端口 1 的输入数据包，如果需要单段时隙延迟，则将在输入端转换为波长 λ_2，并交换到开关结构的端口 1。

假设流量模式如前述的一样，$\rho=0.8$，在 16×16 的开关情况下为了得到 10^{-6} 的丢包率，总共只需要 25 个延迟线，而不是在开关结构中使用单波长情况下每个输出端口就需要 25 个延迟线。在 9.6 节中，将研究其他的在开关结构内部利用波长实现交换和/或缓冲功能的开关结构的例子。

下一步将考虑 WDM 网络的情况。在这种情况下，传输链路本身就使用了多波长。与单一波长的系统相比，可以利用跨过多波长的突发流的统计性质进一步减少所需的共享缓存。图 9.21 显示了再次使用可调谐波长转换器和延迟线的一种可能的开关结构[Dan97]。在该开关的输入端，波长被解复用并馈送通过可调谐波长转换器，然后进入开关结构。延迟线被连接到开关结构的输出端。预定给一个给定输出端口的 W 个波长共享一组延迟线。在这种情况下，在处理竞争方面有更多的灵活性。如果两个数据包需要在同一输出端口输出，则它们或者可以在时间上得到延迟，或者可以被转换成不同波长，并同时交换到输出端口。TWC 将输入数据包转换至所需的输出波长，开关将这些输入数据包路由到正确的输出端口和通往该输出端口的适当的延迟线。

随着波长数的增加，如果每个波长的负载保持不变，则所需的缓存数量将会减少，因为在任何给定的时隙中找出另一个空闲波长的概率是相当高的。基本上，共享几个波长之间的能力，并允许更好地利用这种能力。文献[Dan97]表明，在使用 16×16 的开关并满足每个波

长0.8负载的情况下，当达到10^{-6}的丢包率时，所需延迟线的数量从不使用多波长时的每输出端口25个下降到使用4波长时的每输出端口7个，或使用8波长时的每输出端口4个。

表9.1比较了本节所讨论的不同缓存方法所需延迟线的数量。请注意，延迟线的数量仅是设计开关结构时所必须考虑的众多的参数之一。其他参数包括开关结构规模、所需波长转换器的数量和内部使用的波长数量(以及相关联的复用器和解复用器的复杂性)。虽然已阐述了图9.18到图9.21的几种结构的例子，但与此同时为权衡这些相互关联的参数提出了很多派生结构。有关内容请见文献[Dan97，ZT98，Hun99，Gam98，Gui98]中更多的例子。

表9.1 不同开关结构所需延迟线的数量。假设每波长每输入端口均匀分布负载为0.8，丢包率为10^{-6}，开关规模为16×16

缓存类型	输入λ_s	内部λ_s	内部结构	每输出端口延迟线	总延迟线
输出(图9.19)	1	1	16×16	25	400
循环(图9.18)	1	1	23×23	7	112
输出(图9.20)	1	64	16×16	共享	26
输出(图9.21)	4	4	64×128	7	112
输出(图9.21)	8	8	128×80	4	64

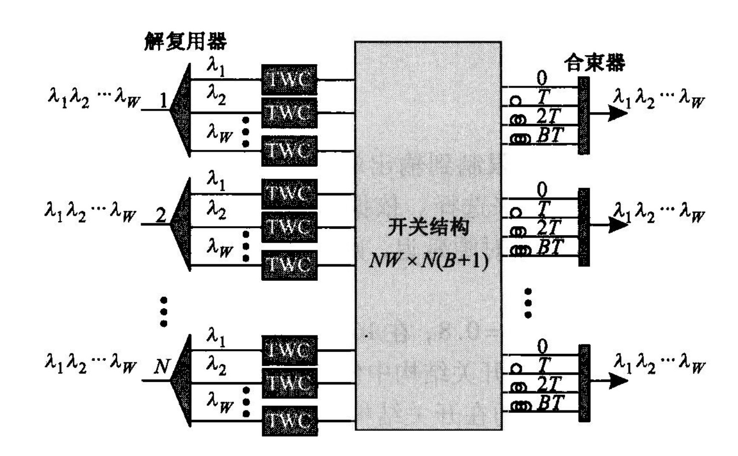


图9.21 一个能够交换多个输入波长的输出缓存光开关的例子。该开关结构使用TWC和波长解复用器。这些TWC将输入的数据包转换至所需的输出波长，并且该开关结构将数据包路由到正确的输出端口和那个输出端口的适当的延迟线后，以便输出

9.4.5 偏射路由

偏射路由是Baran在1964年首先提出的[Bar64]。该方案是20世纪80年代在处理器互连网络的情况下研究和实施的[Hil85，Hil87，Smi81]。在这些网络中，如光分组交换网络中一样，缓存器是昂贵的，由于涉及高传输速度，因而偏射路由被用做替代缓存的一种方法。偏射路由有时也被称为热土豆路由(hot-potato routing)。

直观地说，将数据包错误路由而不是将其存储，将使数据包到达其目标平均来说要走更长的路径，从而会导致网络中延迟时间增加和吞吐量减少。这是开关结构中没有缓存器所付出的代价。已经在一些常规的网络拓扑结构中详细分析了这些问题的权衡，如曼哈顿街网(the Manhattan Street network)[GG93]，其中一个例子如图9.22所示；或另一种常规互联网络

混洗网(shufflenet)[KH90, AS92]，这种网络的一个例子如图9.23所示，或两者兼而有之[Max89, FBP95]。常规的拓扑结构通常用于处理器互连，用于局域网中也可能是可行的。然而，它们不大可能用在广域网(WAN)中，因为广域网中所用的拓扑结构通常是任意的。尽管如此，与目标冲突的事件中采用缓存方法相比，这些分析有助于阐明即使在广域光分组交换网络中实施偏转路由时所涉及的问题，以及由此带来的性能下降问题。

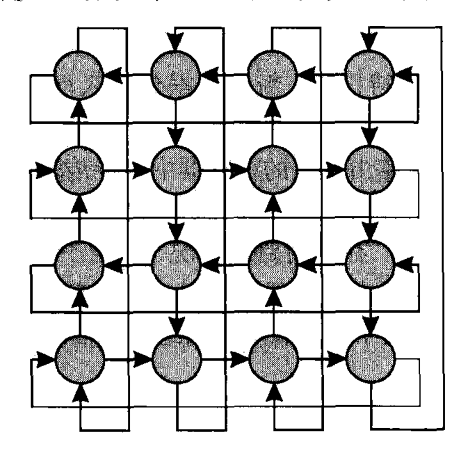


图9.22　具有$4^2=16$个节点的曼哈顿街网。在n^2个节点的网络中，这些节点被排成n行和n列的正方形网格。每一个节点可传送信息到两个节点——一个在同一行，而另一个在同一列。每个节点还收到来自其他两个节点的信息——一个在同一行，而另一个在同一列。假设n是偶数，传输方向在行和列上顺次交替

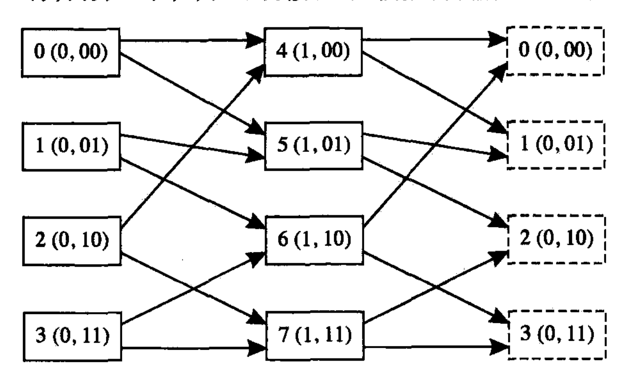


图9.23　8个节点的混洗网。更普遍的情况是，一个(Δ, k)混洗网包含$k\Delta^k$个节点，排成k列，每列Δ^k个节点。可以从k位移位寄存器的状态转移图来思考(Δ, k)混洗网，其中每位数字都处于$\{0,1,\cdots,\Delta-1\}$中。每个节点$(c, a_0a_1\cdots a_{k-1})$用其列标号$c\in\{0,1,\cdots,k-1\}$与$k$位数字串$a_0a_1\cdots a_{k-1}, a_i\in\{0,1,\cdots,\Delta-1\}, 0\leqslant i\leqslant k-1$来标记。如果节点$j$的字符串可以从节点$i$的字符串移一位获得，则从节点$i$到节点$j$之间有一条边线。换言之，从节点$(c, a_0a_1\cdots a_{k-1})$到节点$((c+1) \bmod k, a_1a_2\cdots a_{k-1}*)$，其中$*\in\{0,1,\cdots,\Delta-1\}$之间有一条边线

在能讨论这些结果之前，需要稍微修改图9.2所示的路由节点模型。在前面讨论这个图时，曾经说过该路由节点有一条输入链路和一条输出链路来自/到与其链接的每一个其他的路由节点和终端节点。在许多情况下，路由节点与终端节点在同一位置，这就使有关数据包传送或接收的信息几乎可以在瞬间就在这些节点之间交换。特别是，只有在没有其他数据包

的目标是相同的输出链路时，该终端节点才有可能注入新的数据包到其相关联的路由节点。因此，这个新注入的数据包既不会得到偏射，也不会导致其他数据包偏射。在实际中，这可以作为一种合理的假设。

延迟

偏射路由的第一个后果是网络中数据包所经历的平均延迟时间比存储转发网络中的延迟时间长。在这个比较中，不仅仅网络拓扑结构是固定的，而且每对源-宿节点对之间数据包到达时间的统计值也是固定的。特别是，新的数据包进入网络的注入率，又被称为到达率(arrival rate)，对每一对源-宿节点来说必须是固定的。一个数据包所经历的延迟由两部分组成。首先是排队延迟——在每个路由节点的缓存器中等待传输所花费的时间。在偏射路由的情况下没有排队延迟。数据包所经历的第二部分延迟是传输延迟——数据包从源节点到宿节点传输经历所有链路花费的时间。在偏射路由情况下，由于数据包偏离它们的目标方向，传输延迟通常大于有缓存器时路由所产生的延迟。因此在大多数情况下，对于一个给定的到达率，偏射路由网络中的整体延迟大于在存储转发网络中的整体延迟。

吞吐量

与有缓存器的路由相比，偏射路由的另一个后果是网络吞吐量下降。现在能够满足我们要求的这些网络吞吐量的一个非正式定义是，来自源节点的新数据包注入网络的最大比率。显然，这取决于网络相互连接的拓扑结构和链路上的数据传输比特率。此外，它还依赖于流量模型，它必须固定在限定的吞吐量。流量模型明确规定了每对源-宿节点间新数据包所占的百分率。通常情况下，在所有这样的网络的理论分析中，吞吐量是在一种均匀流量模型情况下估计的，这意味着网络中对所有源-宿节点对的新数据包的到达率都是相等的。如果所有的链路都以同样的速度运行，吞吐量可以很方便地表示为链路速度的百分率。

对有几百到几千个节点规模的曼哈顿街网来说，偏射路由达到了有缓存器路由时吞吐量的55%至70%[Max89]。对有相同规模大小的混洗网来说，该值只是有缓存器时吞吐量的20%到30%。然而，因为在相同规模网络情况下，混洗网的吞吐量比曼哈顿街网的吞吐量大得多(在缓冲器路由的情况下)，因而在偏射路由的情况下曼哈顿街网的实际吞吐量低于混洗网。所有这些结果都是在均匀流量模型的假设下得出的。

那么，这些结果对不规则的网络意味着什么？要讨论这个问题，让我们来看看这两种网络在属性方面的一些差异。任何网络的一个重要属性是它的直径，这是网络中任何两个节点之间在最短路径上的最大跳数。换言之，直径是网络中两个节点之间的最大跳数。然而在大多数网络中，直径越大，即使按平均来说数据包传输到宿节点的跳数就越多。曼哈顿街网的直径与$\sqrt{n}$成正比，其中 n 是网络中的节点数量。另外，混洗网的直径与 $\log_2 n$ 成正比(假设混洗网的连接度为2)。因此，如果考虑有相同数量的节点和边线的曼哈顿街网和混洗网，则在有缓存路由时曼哈顿街网的吞吐量比混洗网低，因为每个数据包平均来说不得不经历更多的边线。对于任意的网络，可以概括出：网络的直径越小，有缓存路由时网络的吞吐量就越大。

对偏射路由来说，必须考虑的网络第二个属性是其偏射指数。在文献[Max89]中已介绍过这一属性，虽然那时它不是这个名称。在后来的论文[GG93]中给出了正式定义，并进行了更为详细的讨论。偏射指数是指单次偏射使网络中某两个节点之间最短路径所增加的最大跳数。对于曼哈顿的街网，单次偏射最多使路径长度增加四跳，因此它的偏射指数为4。另一方面，混洗

网偏射指数为 $\log_2 n$ 跳。事实上，曼哈顿的街网有一个显然比混洗网大得多的相对吞吐量——偏射路由吞吐量，它表达为与存储转发吞吐量的比率(55% ~70%和20% ~30%)。然后，对于任意的网络，偏射指数必须保持一个小值，以使偏射路由时吞吐量仍然很高。

综合这两种意见，可以得出结论：小直径和小偏射指数的网络拓扑结构最适合光分组交换网。结合曼哈顿街网和混洗网拓扑结构，并具有这些属性，从而设计出的一种规则网络拓扑结构在文献[GG93]中进行了讨论。除了选择一个良好的网络拓扑结构(不一定是规则的)外，偏射路由网络的性能可以通过采用适当的偏射规则得到进一步改善。偏射规则指定了一种方法，利用该方法在争夺同一个开关输出端口的数据包中选择将要偏射的数据包。在引述的结果中，假设当两个数据包之间发生冲突时，这两个数据包都有可能被偏射。这种偏射规则被称为随机的。另一种可能的偏射规则被称为小余量规则(closest-to-finish)[GG93]，该规则表述为当两个数据包争夺同一个输出端口时，那个离其宿节点更远些的数据包被偏射。这会减少一个数据包所受到的偏射的平均次数，从而提高吞吐量。

小缓存器

还可以考虑带有非常有限数量的缓存器时的偏射路由，例如，在每个输入端口有可以缓存一至两个数据包的缓存器。如果这些有限的缓存器已经满了，数据包再进行偏射。这种有限缓存器偏射路由策略与没有任何缓存器的最纯粹形式的偏射路由相比，可实现更高的吞吐量。有关定量的细节可见文献[Max89，FBP95]。

活锁

当网络中采用偏射路由时，还存在数据包不断进行偏射而永远达不到其目标节点的可能性。这种现象被称为“死锁”(deadlock)[GG93]和“活锁”(livelock)[LNGP96]，但称为“活锁”似乎更合适些。活锁现象有些类似于存储转发网络中遇到的路由循环(见3.5节)，但路由环路是一个短暂的现象，而活锁是偏射路由的一种固有特性。

可以制订适当的偏射规则来消除活锁现象。然而，要证明任何一种特定的偏射规则不存在活锁现象却似乎很难。为了进一步讨论这个问题，可以参考文献[GG93，BDG95](文中使用“死锁”这个术语)。消除活锁的方法之一是简单地丢弃跳数超过一定阈值的数据包。

9.5 突发交换

突发交换网是PPS网络的一种派生网络。在突发交换网中，源节点发送一个信头，并接着发送一个突发数据包。通常，信头在带外控制信道上以一个较低的速率传送，而大多数协议都假定具有带外控制信道。中间节点读取数据包信头，并激活其开关，将随之而来的突发流连接到相应的输出端口，如果届时有合适的输出端口空闲的话。如果没有合适的输出端口可用，则突发流要么被缓存，要么被丢弃。突发交换和传统的光分组交换之间的主要区别是，突发持续时间要比分组交换中数据包持续时间长很多。

在突发交换中，如果突发包持续时间足够长，则有可能在网络上发送突发数据包之前需要申请或预留带宽。为此目的，已提出了各种协议。例如，有这样一个协议被称为恰量时间协议(Just-Enough-Time，JET)，其工作原理如下。准备发送突发数据包的源节点首先在控制信道上发出一个信头，提醒沿着突发数据包经过的路径上所有节点做好准备。在一定时间周

期后接着发送突发数据包。该时间周期应足够长，使得有时间处理信头，并能设置开关，使突发数据包到达时交换通过，因此，在所有节点中不需要任何附加的缓存。

总体而言，突发交换本质上是 PPS 的一种变种，其中数据包长度是可变的，并且相当长，在其所有节点上很少使用或根本没有缓存器。如分组交换一样，突发交换的主要问题之一是当发生竞争时为了达到合理的突发丢包率需要确定节点上所需缓存器的大小。前面在 9.4 节中讨论过的同样技术，在这里也适用。

9.6 试验平台

多年来已建立了几种 PPS 网络试验平台。这些试验平台的大多数主要是演示 PPS 网络的某些关键功能，如复用与解复用、路由/交换、信头识别、光域时钟恢复(同步或位相位对齐)、脉冲发生器、脉冲压缩和脉冲存储等。在本节其余部分，将讨论一些这样的平台。这些试验平台的主要特点总结如表 9.2 所示。

表 9.2 在 9.6 节中描述过的光分组交换试验平台的主要功能

试验平台	拓扑	比特率	演示的主要功能
KEOPS	开关	2.5 Gb/s(每端口)	4×4 开关 亚纳秒交换 全光波长转换 可调谐激光器 数据包同步
KEOPS	开关	10 Gb/s(每端口)	16×16 广播/选择 亚纳秒交换
FRONTIERNET	开关	2.5 Gb/s(每端口)	16×16 可调谐激光器
NTT	开关	10 Gb/s(每端口)	4×4 广播/选择
Synchrolan (BT Labs)	总线	40 Gb/s(汇聚)	比特间插数据传输与接收
BT Labs	开关	100 Gb/s(每端口)	基于光信头识别 1×2 开关路由
Princeton	开关	100 Gb/s(每端口)	数据包压缩 基于 TOAD 的解复用
AON	螺旋结构(总线)	100 Gb/s(汇聚)	光锁相环，脉冲产生、压缩、存储
CORD	星形	2.5 Gb/s(每端口)	竞争解决

9.6.1 光分组交换关键技术

光分组交换关键技术(Keys to Optical Packet Switching, KEOPS)[Gam98 Gui98, RMGB97]是由欧洲的一组研究实验室和大学进行的一项重大工程。它的前身是 ATMOS(ATM 光交换)项目[Mas96, RMGB97]。KEOPS 演示了几个 PPS 网络的组件，并将说明不同的交换结构的两种各自独立的示范实验放在一起。所演示的组件包括利用半导体光放大器中的交叉相位调制实现了高达 40 GHz 的全光波长转换器(见 2.8 节)，使用可调延迟线、可调谐激光器和低损耗磷化铟集成的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)型电光开关来制作 2.5 Gb/s 数据包同步器件。

在数据传输比特率为 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s、数据包信头传输比特率为 622 Mb/s 的条件下演示了网络功能。KEOPS 交换结构在开关内使用内部波长交换作为完成交换和缓存的关键工具，而没使用大型空间光开关。从这个意义上说，KEOPS 示范实验是图 9.20 所示结构的变异结构。图 9.24 所示的第一个演示实验使用了带有波长路由的二级交换方案。其中，第

一级将输入信号转换至合适的波长，并让其通过一个波长解复用器而路由至一个适当的延迟线。第二级再使用一个可调谐波长转换器及波长解复用器和复用器的组合，将数据包路由到正确的输出端口。每个输入端至少接入到每组延迟线中的一段延迟线。由于延迟线依次接入至所有的输出端口，因此该开关可被认为是共享输出缓存的一种形式。

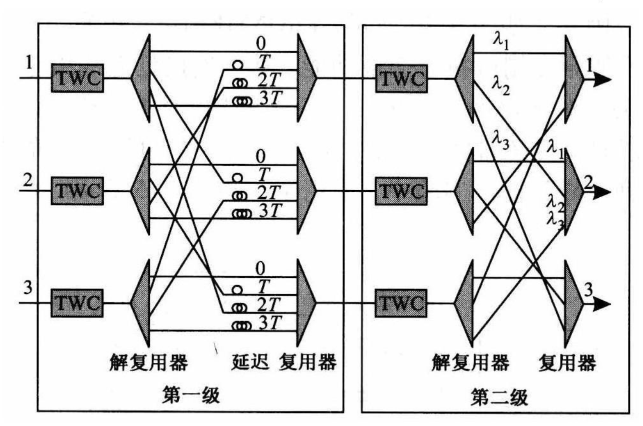


图 9.24 在 KEOPS 实验中使用的波长路由分组开关

开关控制器(图中未显示)按如下步骤设置输入数据包至各个延迟线：每个输入数据包按可能最小出现的延迟时间 d 设置，这样，(1)没有其他的数据包在同一时隙设置到相同的输出端口；(2)没有其他的数据包像所需的数据包那样在同一时隙安排在任何延迟线段内导致去往同一个第二级的 TWC；(3)为了按到达顺序传送数据包，没有先前来自同一个输入端的数据包到达同一个输出端口的延迟比 d 大。

另一个使用广播选择的方法的演示实验如图 9.25 所示。这里，在不同的输入端到达的数据包被分配给不同的波长。然后，每个数据包被广播传送到一个提供不同的延迟时间的延迟线阵列。每个延迟线可以同时存储多个不同波长的数据包。因此，每个输入包可经过几个时隙段后在输出端输出。其中，利用波长解复用器、光开关和波长复用器组合一起选择一个特定的时隙。因此，此开关仿效了每输出端有 B 个时隙缓存器的输出缓存开关。本方法中，采用了一个 16 × 16 开关。

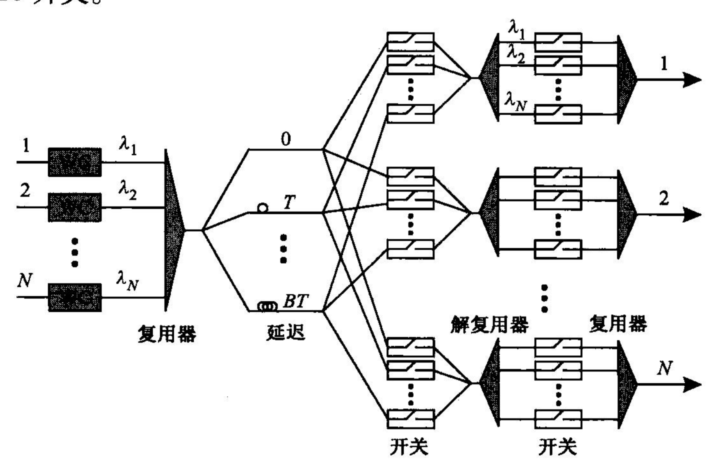


图 9.25 在 KEOPS 中使用的广播选择分组开关

9.6.2 NTT 公司光分组交换实验

NTT 公司的研究人员利用有点类似 KEOPS 的方法演示了光分组交换实验 [Yam98, HMY98]。像 KEOPS 实验中开关结构一样，这个实验中的开关结构也采用了内部波长交换作为执行交换功能的关键因素。如图 9.26 所示，FRONTIERNET 开关[Yam98]使用了可调谐波长转换器，并联同阵列波导光栅以执行交换功能，其后连接延迟线缓存器。这又是一个带两级选择的输出缓存开关。对于每个输出端口，第一级选择时隙，第二级选择该时隙内所需波长。在实验中，可调谐波长转换器将输入的电数据通过一个可调谐激光器和外调制器转换成可调光数据输入到阵列波导光栅。实验中，采用了工作在 2.5 Gb/s 并带光纤延迟线缓存的 16×16开关。

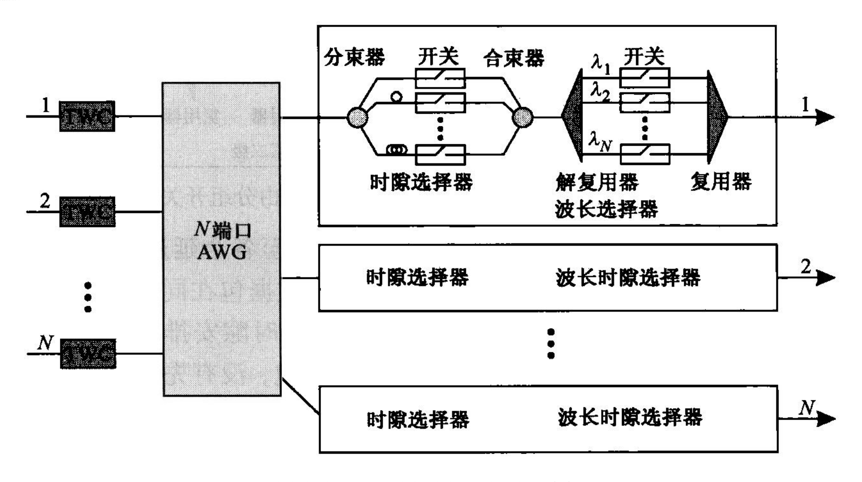


图 9.26 FRONTIERNET 结构

在另一个实验[HMY98]中，通过广播一个波长编码信号到共享延迟线阵列，并在输出端口选择适当的时隙来完成交换，这又像 KEOPS 中使用的方法。实验演示中采用了工作在 10 Gb/s的数据传输比特率的一个 4×4 开关。实验演示的关键技术包括可调谐激光器和光纤延迟线缓存。

9.6.3 BT 实验室试验平台

英国电信公司(BT)实验室的研究人员展示了本章所讨论的 PPS 网络的几个特点 [CLM97]。在基于总线拓扑结构的被称为 Synchrolan 的原型广播局域网[LGM+97, Gun97b]上，演示了高速信号在光域的复用与解复用。在每个比特率为 2.5 Gb/s 的复用信道上使用了比特间插。在总线上传输的总比特率是 40 Gb/s。时钟信号(类似于成帧脉冲)随着比特间插的数据信道一起分发。时钟信号的可用性意味着不需要光时钟恢复技术。时钟信号不需要单独的时隙，而是与数据信号正交的偏振状态传输。这使得时钟信号很容易与数据信号分离。在后来的实验[Gun97a]中，数据信号和时钟信号各自通过一芯标准单模光纤(非保偏光纤)传输，这样就不需要使用昂贵的保偏组件。

BT 实验室还分开展示了一个 PPS 节点[Cot95]。来自输入数据包的光信头与本地的，即相应于该 PPS 节点的信头通过光与门(但与讨论过的与门是不同类型)进行了对照。在将信

头对照的同时，数据包的其余部分就存储在光纤延迟线内。与门的输出被用来控制一个1 ×2开关，依据输入数据包信头与本地信头是否匹配或失配来确定将输入数据包传送至两个输出端的哪一个。

9.6.4 普林斯顿大学试验平台

该试验平台由普林斯顿大学光波通信实验室(the Lightwave Communications Laboratory at Princeton University)研发，并获得 DARPA 资助[Tol98，SBP96]。目标是展示工作在 100 Gb/s 传输比特率下的网络中的单个路由节点。使用了数据包间插技术，并使用了 9.1 节中描述过的技术将 100 Mb/s 的电数据包在光域压缩到 100 Gb/s 的传输比特率。由于在压缩数据包的过程中所使用的半导体光放大器(见图 9.7)存在局限性，在连续的数据包之间需要 0.5 ns (100 Gb/s 传输比特率下相对于 50 比特)的保护带宽。压缩数据包信头的光解复用是利用 9.1 节描述的一列与门来完成的。9.1.3 节中描述过的 TOAD 结构被用做与门。要使用的 TOAD 数量等于数据包信头的长度。因此，光编码的串行数据包信头被一列 TOAD 转换成一个并行的电信头。

9.6.5 全光网

这个试验平台是由全光网(AON)联盟开发的，该联盟包括 AT&T 贝尔实验室、数字设备公司和麻省理工学院[Bar96]。目的是要开发一个使用数据包间插技术的、运行在总传输比特率为 100 Gb/s 的光时分复用局域网/城域网(TDM LAN/MAN)。不同业务类型，特别是保证带宽业务和按需带宽业务被建议予以支持。该试验平台所使用的拓扑结构如图 9.27 所示。实质上这是一种总线拓扑结构，其中用户在总线的上半部分发送，并从下半部分接收。然而，与按需带宽传输的一个区别是，每个用户被连接到总线的两个点上，使得保证带宽总是上行传输。因此，该种拓扑结构具有如图 9.27 所示的螺旋形状，故这种网络起名为螺旋局域网(HLAN)。

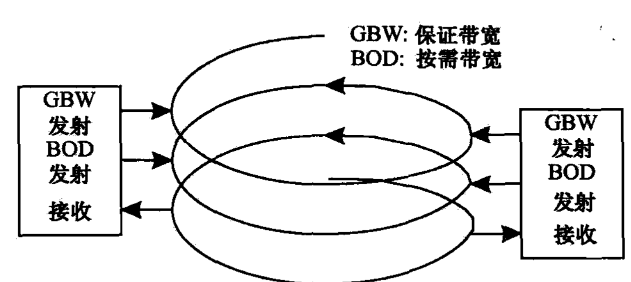


图 9.27　拟在 AON TDM 试验平台上使用的螺旋局域网拓扑结构

在一些实验中演示了一个光学锁相环。在这些实验中，一个 10 Gb/s 的电控锁模激光器的频率和相位被锁定在 40 Gb/s 的输入数据流的频率和相位上(40 Gb/s 数据流中，每第 4 个脉冲与 10 Gb/s 数据流中一个脉冲对齐)。其他演示的技术还包括短脉冲发生器、脉冲压缩、脉冲存储和波长转换。

9.6.6 采用延迟线解决竞争方法的试验平台

采用延迟线解决竞争方法(CORD)的试验平台是由美国马萨诸塞大学、斯坦福大学和GTE实验室组成的联盟开发的[Chl96]。试验平台的框图如图9.28所示。该试验平台包括两个节点，使用不同的传输波长(1310 nm和1320 nm)在2.488 Gb/s的传输比特率上传输ATM长度的数据包(ATM的数据包长度为53个字节)。一个3 dB耦合器将所有数据包广播传输至两个节点。每个节点都生成发往本节点和另一节点的数据包。这就在两个接收器端引起了竞争。来自每个节点的数据包信头加载在数据带宽(≈2.5 GHz)外的频率不同的副载波(3 GHz和3.5 GHz)上。用从输入信号中耦合出小部分功率(10%)的方法来接收副载波信头。

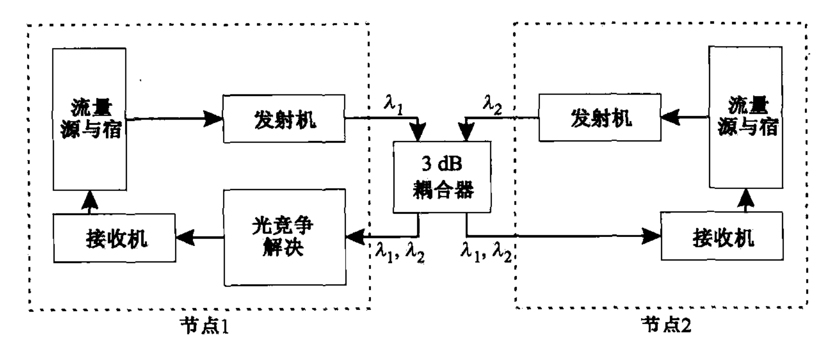


图9.28　CORD试验平台框图

时间被分为时隙，每段时隙的长度等于250 ns。由于每个ATM数据包的长度只有424/2.488≈170 ns，因此每段时隙有相当数量的保护带宽。节点之间的时隙同步是利用节点基于它们到枢纽节点的传输延迟时间来调整它们的时钟来完成的。不过，本试验平台中没有使用单独的同步器节点，而是其中节点之一本身起着同步器作用(在CORD试验平台中称其为“主”节点)。副载波信道上的数据传输比特率被选择为80 Mb/s，这样，一个20比特的信头可以在250 ns的时隙中被发送。

在节点之一中，使用了一个类似于图9.15所示的前馈延迟线结构，周围有WDM解复用器和复用器，这样，两个波长上的信号可以延迟不同的时间。因此，这个节点就有更多的机会解决发往该节点的数据包之间的竞争。这就是这个试验平台称为“采用延迟线解决竞争方法”试验平台的原因。目前，这个试验平台是用分立元件建立的，包括铌酸锂开关、半导体光放大器(用于补偿损耗)和用做延迟线的保偏光纤。一种集成的竞争解决光学(Contention Resolution Optics，CRO)方案正在开发中，它将3个2×2开关和半导体放大器都集成在一片InP基底上。

总结

光分组交换网比电分组交换网具有实现更大容量的分组交换的潜力。然而，需要在技术取得重大进展后才能使光分组交换网付诸实践，并且也存在一些明显的障碍需要克服。光分组交换技术的现状有些类似于发明集成电路之前电路的状态。光分组交换所需的所有组件现在都处于很不成熟的状态，并正在实验室研究之中；它们不是难以实现，就是很笨重，或者

非常昂贵。例如，光缓存是利用几百米延迟线来实现的，不仅体积大，而且只能提供数量有限的存储。在任何较长的光纤距离上传输 100 Gb/s 和更高的线路速率的数据仍然是一项重大的挑战。此时，高速光开关有比较高的损耗，包括偏振相关损耗，并且不适合集成，而这是实现大型开关必不可少的。虽然现在已经提出了有关光波长转换器的多种结构，但现在仍然处于起步阶段。当在如此高的比特率下复用、解复用或同步信号时，各种器件的温度依赖性也是一个重大的问题。还需要有效的方法防止信号通过这些开关时所产生的信号劣化。例如，一个便宜的全光 3R 再生器沿着 2.8 节中研究的路线，将使许多这样的结构更加实用。在可预见的未来，将继续完成在电域分组交换中所有的智能控制功能。

在近期，将继续看到光层被用来提供电路交换业务，同时通过 IP 路由器或以太网交换机在电域实现分组交换功能。光分组交换，特别是突发交换，被定位于未来可能用来置换光电路层，但同时在更高层上仍保留电分组交换。这一想法是由于流量的突发性质，认为电路交换的链路仍然没有得到充分利用，而使用一种潜在的光分组层来取代电路层将有利于提高链路利用率。

进一步阅读材料

这里有大量有关光分组交换的结构和性能评估，以及实验和试验平台方面的研究活动。有关概述参见文献[HA00, Yoo06]，以及文献[Pru93, BPS94, Mid93]。文献[BIPT98, MS88]是涉及该主题的专刊。光分组交换项目的另一些例子是 OPSNET[KPNO05]和 OPORON[NZS+07]。

文献[DW88]中讲述了非线性光纤环镜(NOLM)，在文献[BDN90]中讲述了其在光解复用中的应用。文献[FHHH90]中讲述了非线性光放大环镜(NALM)。在文献[SPGK93]中讲述了 TOAD 结构，并在文献[KGSP94]中分析了它的工作过程。在文献[GSP94]中讲述了它在数据包信头识别中的应用。在文献[Eis92]中讲述另一种非线性光学环镜结构，它使用了短的环路长度，并在环路上加入了一个 SOA。在文献[CHI+92]中讲述了孤子俘获与门。在文献[Mik99, MEM98]中讲述了使用高速调制器的一些其他解复用方法。数据包的压缩和解压缩方法也可以通过一种称为“速率转换”(rate conversion)的技术实现，详见文献[PHR97]。

对光缓存技术的总结请参阅文献[HCA98, Hal97]。有关分组交换中缓存的许多性能结果可以阅读文献[HK88]。文献[HR98]中讲述了 40 Gb/s 传输比特率下光缓存的研究结果。文献[Dan97, Dan98]中分析了使用波长维度后对减少缓存器数目的影响。文献[SA06]介绍了一项关于确定光缓存的最小数量以实现一个数据包缓冲器的研究。它涵盖了一般类型的包含优先级排队的数据包缓存器。文献[BGR+05]中的仿真结果表明，在一定流量条件下，数据包缓存器的数量可以很少，但仍然可以提供良好的性能。一种可以进一步减少缓存器数量的方法是规范进入网络的流量，从而在网络核心中形成流量突发数据包。在文献[LH06]中给出了这项研究工作的一个例子。在高容量的路由器中，光技术所起的作用在文献[Tuc06]中进行了研究。对于路由器组件，如数据包缓存器和开关结构在功耗和占用空间方面的性能采用光与电的两种实现方法进行了比较。

有关偏射路由的概述请参阅文献[Bor95]。对在超立方体拓扑结构方面采用偏射路由的分析请参阅文献[GH92]。对偏射路由方面感兴趣的其他文章请见文献[HC93, BP96]。文献[BCM+92]描述了一个早期采用偏射路由的分组交换光开关的实验范例。

文献[QY99, Tur99, YQD01]提出了在PPS的背景下使用突发交换。先前在电分组交换网络中提出的类似的概念见文献[Ams83]。

已经讨论过的大多数试验平台和一些还没有讨论过的试验平台在光网络和光交换专刊中进行了描述[BIPT98, CHK+96, FGO+96]。另一种基于波长交换的试验平台结构和实验请见文献[Hun99, Gui00]。在文献[SID93]中描述了一种工作在100 Gb/s及使用包括孤子俘获与门在内的一些孤子逻辑门的孤子环网设计方案。

在本书中，已经讨论了WDM技术及TDM技术，但还没有探索基于光码分多址(OCDMA)的网络。此种情况下，不同的发射机利用不同的编码在时域或频域扩展其数据。编码是经过精心设计的，使得很多发射机可以同时工作而不会产生相互干扰，并且接收机可以采用适当解扩接收信号的方法从许多其他的信号中挑选出所需的发射机信号。光码分多址网络在20世纪80年代末和90年代初是一个热门的研究课题，但这种网络比高速TDM的PPS网络遇到更多的问题。关于这一主题的部分论文见文献[Sal89, SB89, PSF86, FV88]，并从文献[Gre93]中可以看到一份很好的总结。

习题

9.1 在图9.7所示数据包复用中，证明第i个脉冲，$i=1, 2, \cdots, l$，通过k级压缩后所产生的延迟是$(2^k-i)(T-\tau)$。如果在输入端脉冲间相隔时间为T，现在证明，第i个脉冲出现在输出端的时间是$(2^k-1)(T-\tau)+(i-1)\tau$。这样在输出端脉冲间相隔时间为$\tau$。

9.2 通过图9.7所示的数据包复用技术获得的一个压缩后的数据包长度为l比特，原则上可以让它通过一系列$k=\log\lceil l\rceil$的扩展级来解压缩，其中第j扩展级如图9.29所示。问在这个方案中所使用的通-断开关的转换时间应该是多少?

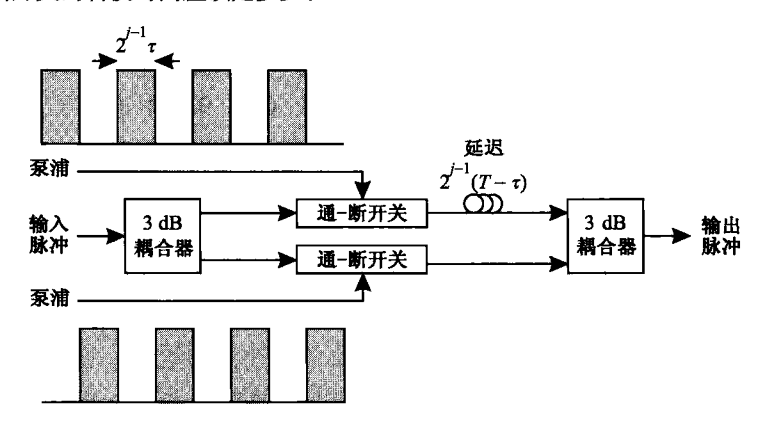


图9.29 原则上可以将压缩后的数据包通过k级扩展的方法组成一个光数据包解复用器。其中2^k是不小于以比特为单位的数据包长度为l的2的最小幂指数。该图显示了第j扩展级的详细结构

9.3 考虑图9.14所示的可调延迟。假设$xT/2^{k-1}$的延迟时间得以实现，其中x是一个k位整数。考虑x用二进制表示，请找出控制输入$c_1, \cdots, c_k$的一个表达式。假设$c_i=1$时，开关i处于直通状态，当$c_i=0$时，开关处于交叉状态。

9.4 考虑图9.9所示的光纤环境，为了将从端口A进入定向耦合器的能量全部转移至端口B，证明其中的非线性元件应该在顺时针信号和逆时针信号之间引入相移π。

9.5 许多光分组交换协议使用一个比净荷比特率低的信头。假设最高的信头比特率为1 Gb/s，并且信头长度是 10 字节。净荷数据比特率为 100 Gb/s。

(a)想让净荷的持续时间是整个数据包的持续时间(包括信头和净荷)的 90%。净荷需要多长字节?

(b)如果想让净荷长度最长为 1000 字节，并保持同样的效率，则信头会在多大比特率下发送?

(c)假设最少需要 1 μs 时间来处理信头，而该时间是整个数据包中除了信头和净荷外额外的保护带宽所占用的时间。同样，如果想保持净荷占整个数据包的 90%，以及信头在 1 Gb/s 传输比特率下占有 10 字节，则净荷应应为多长?

参考文献

[Ams83] S. Amstutz. Burst switching—an introduction. *IEEE Communications Magazine*, 21:36–42, Nov. 1983.

[AS92] A. S. Acampora and S. I. A. Shah. Multihop lightwave networks: A comparison of store-and-forward and hot-potato routing. *IEEE Transactions on Communications*, 40(6):1082–1090, June 1992.

[Bar64] P. Baran. On distributed communications networks. *IEEE Transactions on Communications*, pages 1–9, March 1964.

[Bar96] R. A. Barry et al. All-optical network consortium—ultrafast TDM networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):999–1013, June 1996.

[BCM+92] D. J. Blumenthal, K. Y. Chen, J. Ma, R. J. Feuerstein, and J. R. Sauer. Demonstration of a deflection routing 2 × 2 photonic switch for computer interconnects. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(2):169–173, Feb. 1992.

[BDG95] C. Baransel, W. Dobosiewicz, and P. Gburzynski. Routing in multihop packet switching networks: Gb/s challange. *IEEE Network*, pages 38–61, May/June 1995.

[BDN90] K. J. Blow, N. J. Doran, and B. P. Nelson. Demonstration of the nonlinear fibre loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer. *Electronics Letters*, 26(14):962–964, July 1990.

[BFP93] A. Bononi, F. Forghieri, and P. R. Prucnal. Synchronisation in ultrafast packet switching transparent optical networks. *Electronics Letters*, 29(10):872–873, May 1993.

[BGR+05] N. Beheshti, Y. Ganjali, R. Rjaduray, D. Blumenthal, and N. McKeown. Buffer sizing in all-optical packet switches. In *OFC 2005 Technical Digest*, Anaheim, Mar. 2005.

[BIPT98] D. J. Blumenthal, T. Ikegami, P. R. Prucnal, and L. Thylen, editors. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology: Special Issue on Photonic Packet Switching Technologies, Techniques and Systems*, volume 16, Dec. 1998.

[Bor95] F. Borgonovo. Deflection routing. In M. Steenstrup, editor, *Routing in Communication Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[BP96] A. Bononi and P. R. Prucnal. Analytical evaluation of improved access techniques in deflection routing networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(5):726–730, Oct. 1996.

[BPS94] D. J. Blumenthal, P. R. Prucnal, and J. R. Sauer. Photonic packet switches: Architectures and experimental implementations. *Proceedings of IEEE*, 82:1650–1667, Nov. 1994.

[Bur94] M. Burzio et al. Optical cell synchronization in an ATM optical switch. In

Proceedings of European Conference on Optical Communication, pages 581–584, 1994.

[CHI+92] M. W. Chbat, B. Hong, M. N. Islam, C. E. Soccolich, and P. R. Prucnal. Ultrafast soliton-trapping AND gate. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 10(12):2011–2016, Dec. 1992.

[CHK+96] R. L. Cruz, G. R. Hill, A. L. Kellner, R. Ramaswami, and G. H. Sasaki, editors. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, volume 14, June 1996.

[Chl96] I. Chlamtac et al. CORD: Contention resolution by delay lines. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):1014–1029, June 1996.

[CLM97] D. Cotter, J. K. Lucek, and D. D. Marcenac. Ultra-high bit-rate networking: From the transcontinental backbone to the desktop. *IEEE Communications Magazine*, 35(4):90–95, April 1997.

[Cot95] D. Cotter et al. Self-routing of 100 Gbit/s packets using 6 bit "keyword" address recognition. *Electronics Letters*, 31(25):2201–2202, Dec. 1995.

[Dan97] S. L. Danielsen et al. WDM packet switch architectures and analysis of the influence of tuneable wavelength converters on the performance. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 15(2):219–227, Feb. 1997.

[Dan98] S. L. Danielsen et al. Analysis of a WDM packet switch with improved performance under bursty traffic conditions due to tuneable wavelength converters. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(5):729–735, May 1998.

[DW88] N. J. Doran and D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror. *Optics Letters*, 13(1):56–58, Jan. 1988.

[Eis92] M. Eiselt. Optical loop mirror with semiconductor laser amplifier. *Electronics Letters*, 28(16):1505–1506, July 1992.

[ENW96] A. Erramilli, O. Narayan, and W. Willinger. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(2):209–223, Apr. 1996.

[FBP95] F. Forghieri, A. Bononi, and P. R. Prucnal. Analysis and comparison of hot-potato and single-buffer deflection routing in very high bit rate optical mesh networks. *IEEE Transactions on Communications*, 43(1):88–98, Jan. 1995.

[FGO+96] M. Fujiwara, M. S. Goodman, M. J. O'Mahony, O. K. Tonguez, and A. E. Willner, editors. *IEEE/OSA JLT/JSAC Special Issue on Multiwavelength Optical Technology and Networks*, volume 14, June 1996.

[FHHH90] M. E. Fermann, F. Haberl, M. Hofer, and H. Hochreiter. Nonlinear amplifying loop mirror. *Optics Letters*, 15(13):752–754, July 1990.

[FV88] G. J. Foschini and G. Vannucci. Using spread spectrum in a high-capacity fiber-optic local network. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 6(3):370–379, March 1988.

[Gam98] P. Gambini et al. Transparent optical packet switching: Network architecture and demonstrators in the KEOPS project. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):1245–1259, Sept. 1998.

[GG93] A. G. Greenberg and J. Goodman. Sharp approximate models of deflection routing in mesh networks. *IEEE Transactions on Communications*, 41(1):210–223, Jan. 1993.

[GH92] A. G. Greenberg and B. Hajek. Deflection routing in hypercube networks. *IEEE Transactions on Communications*, 40(6):1070–1081, June 1992.

[Gre93] P. E. Green. *Fiber-Optic Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

[GSP94] I. Glesk, J. P. Sokoloff, and P. R. Prucnal. All-optical address recognition and self-routing in a 250 Gb/s packet-switched network. *Electronics Letters*, 30(16):1322–1323, Aug. 1994.

[Gui98] C. Guillemot et al. Transparent optical packet switching: The European ACTS KEOPS project approach. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(12):2117–2134, Dec. 1998.

[Gui00] K. Guild et al. Cascading and routing 14 optical packet switches. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, 2000.

[Gun97a] P. Gunning et al. 40 Gbit/s optical TDMA LAN over 300m of installed blown fibre. In *Proceedings of European Conference on Optical Communication*, volume 4, pages 61–64, Sept. 1997.

[Gun97b] P. Gunning et al. Optical-TDMA LAN incorporating packaged integrated Mach-Zehnder interferometer channel selector. *Electronics Letters*, 33(16):1404–1406, July 1997.

[HA00] D. K. Hunter and I. Andonovic. Approaches to optical Internet packet switching. *IEEE Communications Magazine*, 38(9):116–122, Sept. 2000.

[Hal97] K. L. Hall. All-optical buffers for high-speed slotted TDM networks. In *IEEE/LEOS Summer Topical Meeting on Advanced Semiconductor Lasers and Applications*, page 15, 1997.

[HC93] B. Hajek and R. L. Cruz. On the average delay for routing subject to independent deflections. *IEEE Transactions on Information Theory*, 39(1):84–91, Jan. 1993.

[HCA98] D. K. Hunter, M. C. Chia, and I. Andonovic. Buffering in optical packet switches. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(12):2081–2094, Dec. 1998.

[Hil85] W. D. Hillis. *The Connection Machine*. MIT Press, Cambridge, MA, 1985.

[Hil87] W. D. Hillis. The connection machine. *Scientific American*, 256(6), June 1987.

[HK88] M. G. Hluchyj and M. J. Karol. Queuing in high-performance packet switching. *IEEE JSAC*, 6(9):1587–1597, Dec. 1988.

[HMY98] K. Habara, T. Matsunaga, and K.-I. Yukimatsu. Large-scale WDM star-based photonic ATM switches. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(12):2191–2201, Dec. 1998.

[HR98] K. L. Hall and K. T. Rauschenbach. All-optical buffering of 40 Gb/s data packets. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(3):442–444, Mar. 1998.

[Hun99] D. K. Hunter et al. WASPNET—a wavelength switched packet network. *IEEE Communications Magazine*, 37(3):120–129, Mar. 1999.

[KGSP94] M. G. Kane, I. Glesk, J. P. Sokoloff, and P. R. Prucnal. Asymmetric loop mirror: Analysis of an all-optical switch. *Applied Optics*, 33(29):6833–6842, Oct. 1994.

[KH90] A. Krishna and B. Hajek. Performance of shuffle-like switching networks with deflection. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 473–480, 1990.

[KPNO05] D. Klonidis, C. T. Politi, R. Nejabati, and M. J. O'Mahony. Opsnet: design and demonstration of an asynchrnous high speed optical packet switch. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 23(10):2914–2925, Oct. 2005.

[LGM+97] J. K. Lucek, P. Gunning, D. G. Moodie, K. Smith, and D. Pitcher. Synchrolan: A 40 Gbit/s optical-TDMA LAN. *Electronics Letters*, 33(10):887–888, April 1997.

[LH06] Z. Lu and D. Hunter. Contention reduction in core optical packet switches through

electronic traffic smoothing and scheduling at the network edge. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 24(12):4828–4837, Dec. 2006.

[LNGP96] E. Leonardi, F. Neri, M. Gerla, and P. Palnati. Congestion control in asynchronous high-speed wormhole routing networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 58–69, Nov. 1996.

[Mas96] F. Masetti et al. High speed, high capacity ATM optical switches for future telecommunication transport networks. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):979–998, June 1996.

[Max89] N. F. Maxemchuck. Comparison of deflection and store-and-forward techniques in the Manhattan Street and shuffle-exchange networks. In *Proceedings of IEEE Infocom*, pages 800–809, 1989.

[MEM98] D. D. Marcenac, A. D. Ellis, and D. G. Moodie. 80 Gbit/s OTDM using electroabsorption modulators. *Electronics Letters*, 34(1):101–103, Jan. 1998.

[Mid93] J. E. Midwinter, editor. *Photonics in Switching, Volume II: Systems*. Academic Press, San Diego, CA, 1993.

[Mik99] B. Mikkelsen et al. Unrepeatered transmission over 150 km of nonzero-dispersion fibre at 100 Gbit/s with semiconductor based pulse source, demultiplexer and clock recovery. *Electronics Letters*, 35(21):1866–1868, Oct. 1999.

[MS88] J. E. Midwinter and P. W. Smith, editors. *IEEE JSAC: Special Issue on Photonic Switching*, volume 6, Aug. 1988.

[NZS+07] R. Nejabati, G. Zervas, D. Simeonidou, M. J. O'Mahony, and D. Klonidis. The 'oporon' project: demonstration of a fully functional end-to-end asynchronous optical packet-switched network. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 25(11):3495–3510, Nov. 2007.

[PF95] V. Paxon and S. Floyd. Wide area traffic: The failure of Poisson modelling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226–244, June 1995.

[PHR97] N. S. Patel, K. L. Hall, and K. A. Rauschenbach. Optical rate conversion for high-speed TDM networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(9):1277, Sept. 1997.

[Pru93] P. R. Prucnal. Optically processed self-routing, synchronization, and contention resolution for 1-d and 2-d photonic switching architectures. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29(2):600–612, Feb. 1993.

[PSF86] P. R. Prucnal, M. A. Santoro, and T. R. Fan. Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, LT-4(5):547–554, May 1986.

[QY99] C. Qiao and M. Yoo. Optical burst switching (OBS): A new paradigm for an optical Internet. *Journal of High Speed Networks*, 8(1):69–84, 1999.

[RMGB97] M. Renaud, F. Masetti, C. Guillemot, and B. Bostica. Network and system concepts for optical packet switching. *IEEE Communications Magazine*, 35(4):96–102, Apr. 1997.

[SA06] A. D. Sarwate and V. Anantharam. Exact emulation of a priority queue with a switch and delay lines. *Queueing Systems: Theory and Applications*, 53(3):115–125, July 2006.

[Sal89] J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles. *IEEE Transactions on Communications*, 37(8):824–833, Aug. 1989.

[SB89] J. A. Salehi and C. A. Brackett. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part II: Systems performance analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 37(8):834–842, Aug. 1989.

[SBP96] S.-W. Seo, K. Bergman, and P. R. Prucnal. Transparent optical networks with time-division multiplexing. *IEEE JSAC/JLT Special Issue on Optical Networks*, 14(5):1039–1051, June 1996.

[SID93] J. R. Sauer, M. N. Islam, and S. P. Dijaili. A soliton ring network. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 11(12):2182–2190, Dec. 1993.

[Smi81] B. Smith. Architecture and applications of the HEP multiprocessor system. In *Real Time Signal Processing IV, Proceedings of SPIE*, pages 241–248, 1981.

[SPGK93] J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal, I. Glesk, and M. Kane. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD). *IEEE Photonics Technology Letters*, 5(7):787–790, July 1993.

[Tol98] P. Toliver et al. Routing of 100 Gb/s words in a packet-switched optical networking demonstration (POND) node. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(12):2169–2180, Dec. 1998.

[Tuc06] R. Tucker. The role of optics and electronics in high-capacity routers. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 24(12):4655–4673, Dec. 2006.

[Tur99] J. S. Turner. Terabit burst switching. *Journal of High Speed Networks*, 8(1):3–16, 1999.

[Yam98] Y. Yamada et al. Optical output buffered ATM switch prototype based on FRONTIERNET architecture. *IEEE JSAC: Special Issue on High-Capacity Optical Transport Networks*, 16(7):2117–2134, Sept. 1998.

[Yoo06] S. J. B. Yoo. Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 24(12):4468–4492, Dec. 2006.

[YQD01] M. Yoo, C. Qiao, and S. Dixit. Optical burst switching for service differentiation in the next-generation optical Internet. *IEEE Communications Magazine*, 39(2):98–104, Feb. 2001.

[ZT98] W. D. Zhong and R. S. Tucker. Wavelength routing-based photonic packet buffers and their applications in photonic switching systems. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 16(10):1737–1745, Oct. 1998.

第10章　网络应用方面的考虑

本章中将研究网络运营商们在建立新的网络时或将其网络升级到越来越大的容量时所面临的一些问题。我们将从了解网络是如何从业务的角度改变开始，然后了解网络基础设施所发生的变化。第1章中虽然提供了一些这方面变化的概述，在本章中还会进行详细的探讨。尽量了解运营商们为规划自己的下一代网络所选择的各种架构，以及SONET/SDH、IP/MPLS和以太网在其中所起的作用。我们还将讨论网络中光层所起的作用及网络中WDM和TDM光层技术的基本经济因素所起的作用。长途网络和城域网络有不同的需求，这将影响选择所采用的技术。在一般情况下，在不同技术之间做出决定是一件很难的事，网络运营商往往采用先进的网络设计工具来帮助他们了解不同的方法之间的成本权衡。本章中的示例和习题将有助于读者更好地了解这些权衡。

10.1　不断发展的电信网络

由已具规模的运营商运行的传统传送网是基于SONET和SDH的。已经看到，WDM光层在这些网络中发挥着越来越大的作用。

几个因素造成业务提供商重新审视他们自己建立的传送网的方式。第一个推动因素显然是网络流量的巨大增长，但流量组成是不可预知的和不断变化的。另一个推动因素是流量的增长以IP和以太网流量占首要地位。这个流量混合了互联网流量和私人租用线路的流量，这反过来又支持了各种业务，如文件下载(例如，Web流量和文件共享)、语音、视频和游戏。第三推动因素是竞争的加剧，这使得业务提供商重新考虑他们如何配置业务。与新业务带宽可能需求要几周到几个月才能实现、并需要长期合同协议相反，业务提供商越来越多地进入需要迅速部署极具竞争力价格而不需要长期合同的行业境界。

此外，现在新一代运营商运行在与大多数已具规模的运营商明显不同的商业模式下。这些不同的商业模式需要不同的网络体系结构。为互联网业务提供商提供业务的运营商，与提供语音和专用电路交换线路业务的传统运营商相比有着非常不同的需求。现在，也有一类新的运营商的运营商，主要提供大带宽(如622 Mb/s或更高)给其他运营商。这些运营商的运营商与那些向他们的客户提供低速业务(如1.5 Mb/s的线路)的运营商有不同的需求。

在深入研究网络发展之前，值得看看运营商们在他们自己的网络中配置设备时着眼于什么。在这个时期结束时，他们配置的设备必须使他们能够降低其网络的成本，或从采用的设备所激活的新业务中产生收益。从成本角度看，运营商要考虑资金成本和运营成本。资金成本是配置设备的前期成本，而运营成本是维护和运营网络的日常性费用。资金成本包括设备费用、房地产的费用、提供适当的电源和冷却设施及光纤设施的费用等。在传输设备的情况下，目标是尽量降低网络中每英里传输每比特的费用。重要的是，考虑最初的引进费用，以及对已采用的设备进行扩容的费用。

经营成本包括房地产出租/租赁费用，动力和冷却系统的日常性费用，供应、维护和保养设备的劳动力成本，以及更换故障设备，在网络可用性方面缺少业务等级协议等引起的相关费用。虽然大多数运营商认为其网络的运营成本超过资本成本，但资本成本通常更容易量化，因此许多运营商使用资本成本作为制订购买决策的主要依据。

在投资回报方面，发现运营商总是关注用新的业务来产生新的投资回报。这些措施可能包括对开辟新的应用量身定制的业务，例如，在数据中心之间提供存储网络，或修改了的传统业务。例如，采用使运营商能够在需要的地方数分钟内建立和拆除专用电路交换业务线路的设备，将允许运营商为这些业务提出短期费用价格，而不是要求客户购买长期的业务。具有这种能力的另一个好处是，它缩短了采用一种业务的时间，结果导致获得更多的回报。还有另一个好处是，由于无法预见到网络上的流量模型而无须滞留带宽，这样它允许运营商可以更好地利用其现有的网络资源。

上述因素迫使运营商采用可以扩展容量的网络，这种灵活的网络能够在任何地方、任何时间提供所需的各种各样的业务。光层为运营商提供这些高速电路交换的业务，同时也作为一种传输机制携带多路复用的低速数据包和电路交换业务。

10.1.1 SONET/SDH 核心网络

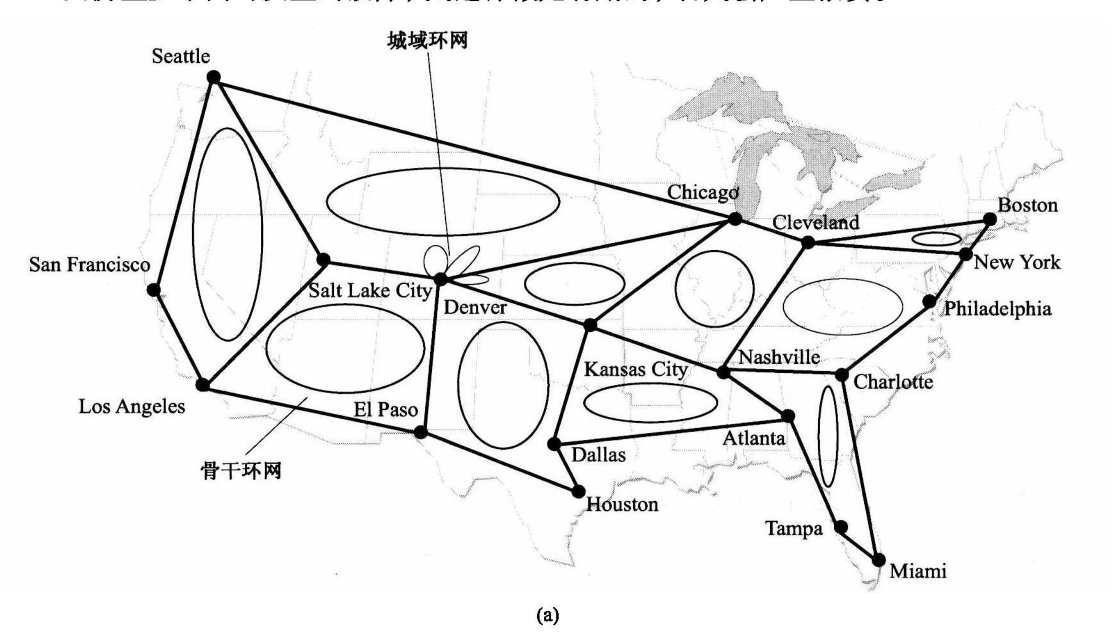
图 10.1(a)所示的是一个典型的业已成熟的运营商的核心网。该网由相互连接的 SONET 环网构成。鉴于今天的容量需求，许多环网实际上由连接同样节点集的多个环网组成，它们被称为叠环网(stacked ring)。这些环网运行在不同的光纤上，或更普通一点，利用 WDM 技术运行在同一光纤的不同波长上。图 10.1(b)显示了该网络中一个大型节点的放大图。该节点有多个波分复用终端(OLT)。通过该节点的每个环网，需要有一个 SONET ADM。这些 ADM 被连接到 OLT，并工作在 OC-48(2.5 Gb/s)或 OC-192(10 Gb/s)的线路速率上。从这些 ADM 下路较低速率的信息流，范围从 45 Mb/s 的 DS3 流到更高速度 622 Mb/s 的 OC-12 流。数字交叉连接系统(DCS)处理速率较低的信息流。数据流经这些低速信号进入网络，并由 SONET ADM 和 DCS 将这些信号复用至更高的速率。这些数据通常通过专用线路进入网络，如 DS1、DS3 或 E1、E3 线，或直接以其他的 SONET/SDH 速率进入。这些速率被明确定义，并映射到 SONET/SDH 的复用结构。其他的数据业务，如来自路由器的 IP 业务或来自以太网交换机的以太网业务，可以通过 DS1/DS3 线传入网络，或通过 OC-3、OC-12 等将更高速率的光信号传入网络，并在 SONET/SDH 基础设施传输。

这个网络原被设计用于承载语音和专线通信。它也可以利用链路层协议，如通用成帧规程(GFP)，承载数据包业务，并利用虚拟级联(VCAT)和链路容量调整方案(LCAS)有效地分配和管理适量的带宽，以承载分组数据包通信。网络提供了有保证的延迟和带宽，以及完善的保护方案，以确保网络的高可用性。SONET/SDH 还提供了广泛的性能监控和故障管理能力。该网络主要是静态的，由 DCS 进行交换以实现连接。该交换在连接建立时就已实现。一旦建立，连接将保持数月或数年，但也可能在中间阶段为了处理网络故障或维护设备而必须进行切换。

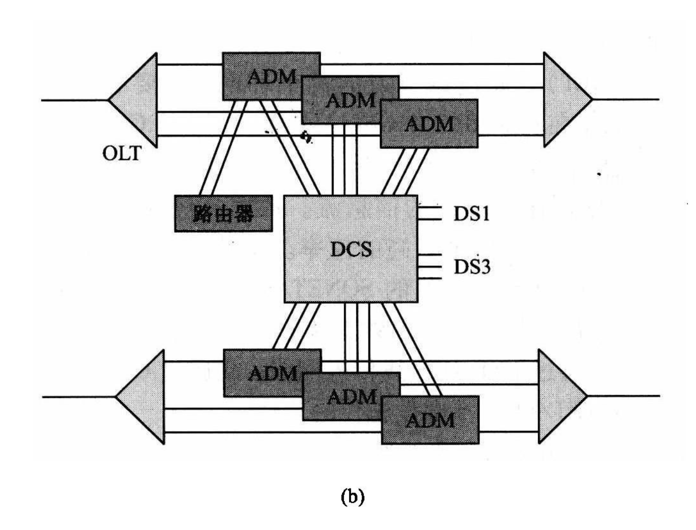
但是正如我们所看到的，当数据业务正在不断增长而处于主导地位，并且出现新的光层设备时，基于 SONET/SDH 网络架构中的一些不足越来越明显。

- 流量需求本身是交错复杂的，基于以下几个原因，环形网结构不能非常有效地支持固有的网状流量需求。需要用多个环网互连，这种互连是相当复杂的，通常通过数字交

叉连接实现。网络中每一环网容量的一半用于保护。此外，如图 10.2 所示，如果两环共享一条公共链路，则对每一环网在重叠的链路上分别保留了保护容量。如果网络需要防止多个同时发生的故障，则这样做是有用的，否则会产生浪费。



(a)



(b)

图 10.1 一个典型运营商的 SONET/SDH 骨干网，图中表明了 SONET/SDH 光分/插复用器(ADM)和数字交叉连接(DCS)设备，以及光线路终端(OLT)和路由器。(a)网络拓扑，由骨干网中相互连接的环网与馈送城域环网组成；(b)典型的节点结构，包括OLT设备，以及大量SONE TADM和DCS设备

- 所有的流量都按约定受到保护。不允许运营商提供各种业务，使其中一些业务受保护，而另一些业务不受保护。但某些流量类型是不需要保护的，例如，尽力而为的 IP 流量。
- 一些运营商提供高速的、尽力而为的 IP 业务。对于这些运营商，SONET/SDH 层提供不了多少好处。由 SONET/SDH 层提供的复用和保护是没有必要的，因此在这些用途

方面不采用 SONET/SDH 设备可明显节省成本。但是请注意，SONET 成帧功能仍然提供了显著的优势：它提供了一组常用的传输比特率，并提供足够的开销以便进行细致的性能监控和故障管理。出于这个原因，当 IP 网络中不需要 SONET 复用和保护的同时，SONET 成帧功能仍然被广泛应用于 IP 设备上。

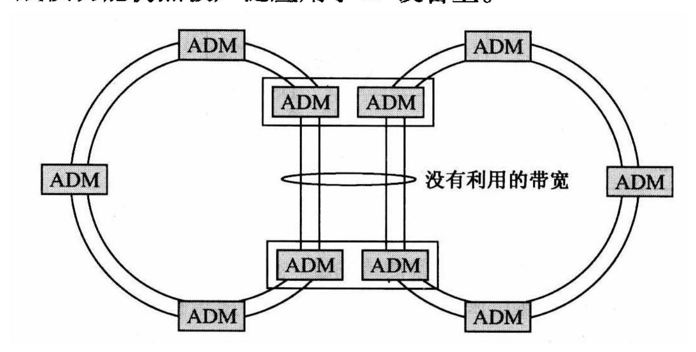


图 10.2　当用 ADM 构建的两个环网共享相同的光纤路由时，带宽就浪费了。沿着共享路由的每个环网的一半带宽被预留用于保护

- 最后，运营商现在还缺乏在他们的网络中能够提供端到端连接的管理和信令系统。目前不同的网元由不同的管理系统管理，并且对已经配备齐全的系统提供连接是一个费时的人工配置的过程。例如，网络中每个 SONET ADM 和 DCS 是用网元管理系统分别配置的，每次一个。虽然有一些大型网络管理系统提供端到端连接，但在这些来自多个供应商的设备之间仍然只有有限的互操作性。业内正在开发信令标准来解决这个问题。

基于这些原因，网络结构正在通过一些相当明显的方式改变。最好的网络架构在很大程度上取决于运营商提供的业务组合，以及取决于当前网络中还存在的传统网络。下面将描述运营商在计划他们的下一代传输网络时将面临的选择。

10.1.2　下一代传输网络架构的选择

光层是电信骨干网的主要传输层。现实的考虑集中于在光层以上采用哪套技术来提供业务。接着又需要决定网络节点中所需采用的一套组件。现在的选择包括 SONET/SDH、IP/MPLS和以太网。图 10.3 和图 10.4 展示了运营商规划其下一代网络时可用的多种选择。

图 10.3 表明使用了 SONET/SDH 作为光层之上的通常传输层。其他业务，包括以太网和 IP/MPLS 都承载在 SONET/SDH 层上。图 10.3(a)显示了这些层的逻辑视图，而图 10.3(b)则显示了设备在一种典型的配置上是如何相互链接的。IP 数据包通常通过链路层协议，如 PPP(点至点协议)传送，它提供了一种链路到链路基础上帧的链路级的完整性。这些数据包然后被组入 SONET/SDH 帧。所有这些功能都通过路由器内部的线卡完成。该路由器被接到 SONET/SDH 机箱内，再将该连接与其他连接复用后通过光层传输。

图 10.4 显示了一个模型，其中的 IP 层直接处于光层的顶部。传统的 IP 层属于 OSI 分层体系的第 3 层。随着 MPLS 的出现，IP 层还包括了第 2 层的功能。在这种情况下，IP 路由器被直接连接到光层设备。基于上述理由，在广域网 Gb/s 中广泛使用 SONET/SDH 或 OTN 帧结构，而成帧过程由路由器内线卡完成(注意，10 Gb/s 以太网在长途连接中有 SONET 成帧结构)。在这种情况下，网络中没有必要保留单独的 SONET/SDH 机箱，这可以明显节约成本。

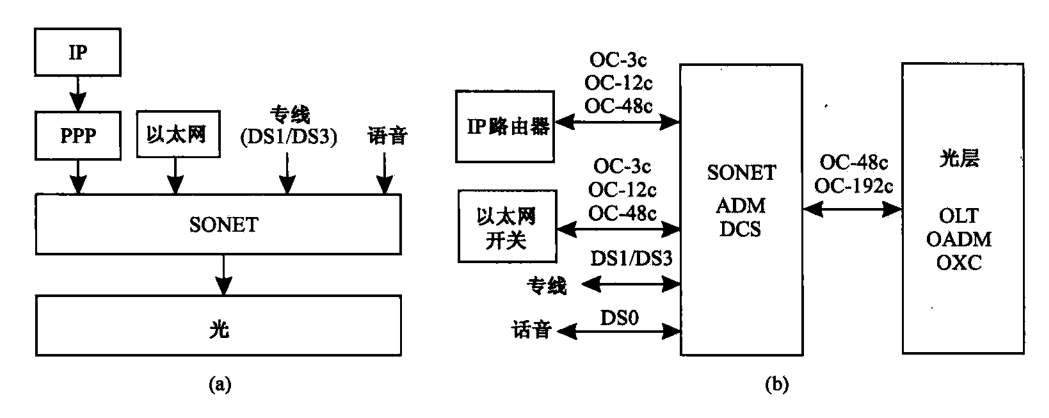


图 10.3 使用 SONET/SDH 作为通常的传输层。作为链路层的功能，IP 数据包被封装入PPP帧内，然后映射到SONET/SDH帧，用于在光纤中传输。图中所示比 特率仅用于图解说明。(a)逻辑分层视图；(b)设备如何相互链接范例

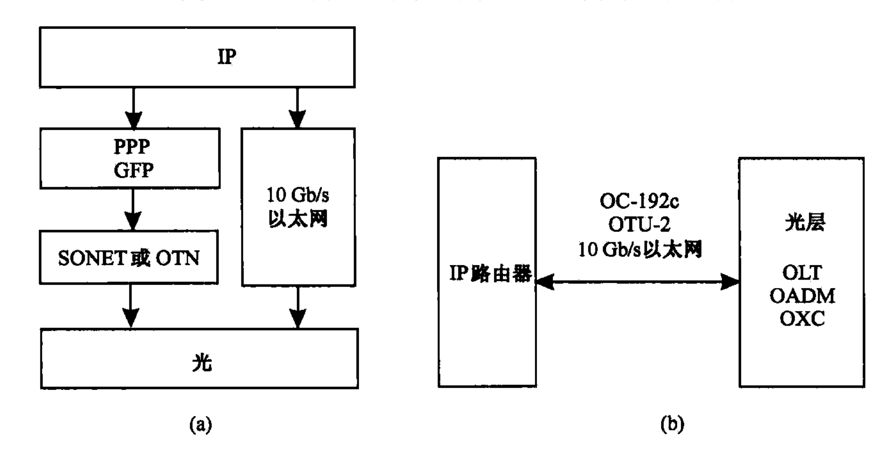


图 10.4 选择 IP 层作为公共业务层。路由器采用成帧协议将数据包在送入光层传输之前嵌入帧中。图中所示比特率仅用于图解说明。(a)逻辑分层视图；(b)设备如何相互链接范例

IP over WDM 的变异

已经讨论了在 IP over WDM 的模式中直接将 IP 路由器连接到光层。现实中，这可以通过图 10.5 所示的多种方法实现。差异主要涉及通过中间节点的流量的处理方式，以及光层提供的灵活程度。在更详细讨论这个问题之前，简单看看大型 IP 路由器和大型光交叉互连设备(OXC)的容量。迄今为止，总趋势是一个最高级路由器的交换总容量比一个 OXC 的交换总容量要小得多。同样，OXC 明显比同等路由器密集(占据更小的空间)。此外，每个路由器端口的成本通常比每个相应的 OXC 端口的成本要大得多。如果给出路由器和 OXC 在功能上及其导致的复杂性之间的相对差异，这些研究结果没有一项是令人惊讶的。

图 10.5(a)画出了一种最简单的 IP over WDM 体系结构，该结构是将 IP 路由器直接连接到光线路终端(OLT)。中间节点的直通流量由路由器处理。然而，这样处置直通流量成本最高，因为需要使用昂贵的路由器端口来处理所有这样的流量。这种方法也需要大量的路由器端口，同时需要大量的地面空间和相关的电源和冷却设备。不幸的是，一些运营商的路由器

网络和传送网络(光层)是由不同群体独立设计和运营的。这往往导致出现与图 10.5(a)不一样的情况。

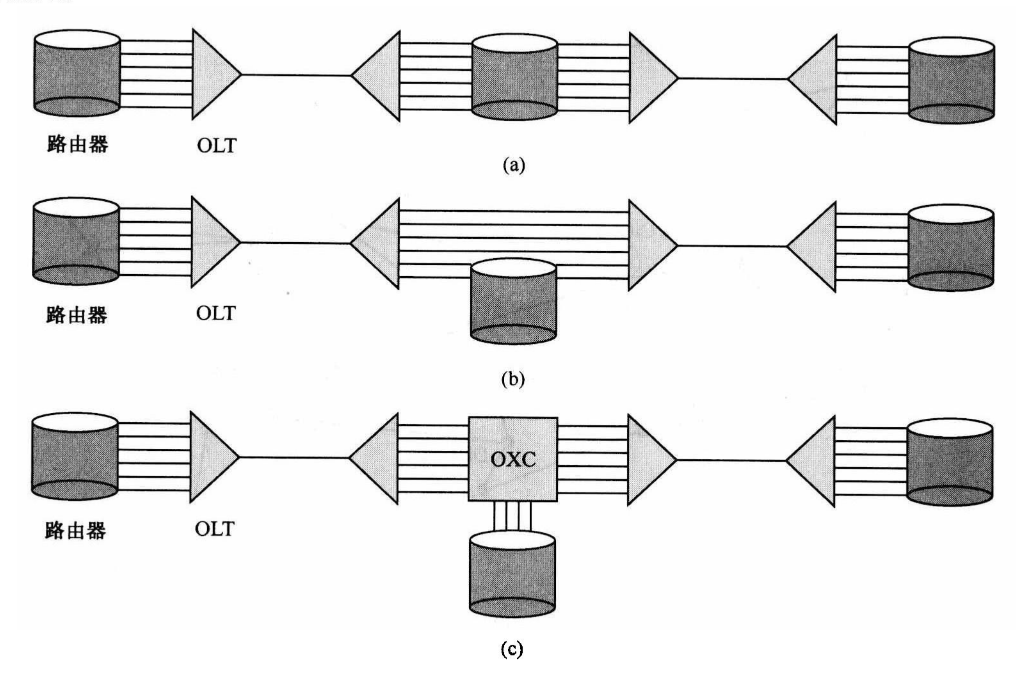


图 10.5　实现 IP over WDM 网络的不同方法。(a)路由器处理直通流量;(b)直通流量以静态方式连接在一起通过光层;(c)直通流量由提供动态重构和流量梳理的光交叉连接(OXC)设备处理

图 10.5(b)所示的第二种方法与第一种方法类似，但直通流量是通过光层内 WDM 终端之间的背对背连接小段缆线处理的。这种方法成本最低，因为处理所有直通流量不需要额外设备或占用所有路由器端口。但是它相对缺乏弹性，在网络中光路不能动态重构。此外，如果有部分信号，如 10 Gb/s 数据包中的 25%，必须在本地下路和上路，则在中间节点进行一些光路的解复用和复用(即梳理功能)也是重要的。

图 10.5(c)所示的第三种方法使用了 OXC 来处理直通流量。在成本上处于上述两种方法之间，但提供了动态设置光路的灵活性;如果需要的话，它也在中间节点进行部分的解复用和复用。因此，这是 IP over WDM 体系的首选结构。

不断发展的网络

虽然 IP 是一种占主导地位的信息传输技术，但网络可支持多种传送业务。图 10.6 所示的体系结构可支持这种多样性。骨干网是一种由光交叉连接设备(OXC)、光分/插复用器(OADM)和光线路终端(OLT)组成的网状网络。网络支持多种流量类型，包括 SONET、以太网和 IP/MPLS。高速信息流直接连接到光层，而低速信息流可利用前面所述的共同业务层进行复用后进入网络。网络容量由 OXC 和 OADM 进行动态配置和分配。在连接到连接的基础上，按需要提供带宽的有效保护。

SONET/SDH 仍然支持语音和专线流量，因为它就是为此目的而设计的。事实上，一些复用，特别是在较高的速率下的复用是通过光层设备，而不是通过单独的 SONET/SDH 机箱

实现的。在光层上运行 IP 的做法被广泛应用，并将继续处于主导地位，因为 IP 是主要的数据包传输架构。

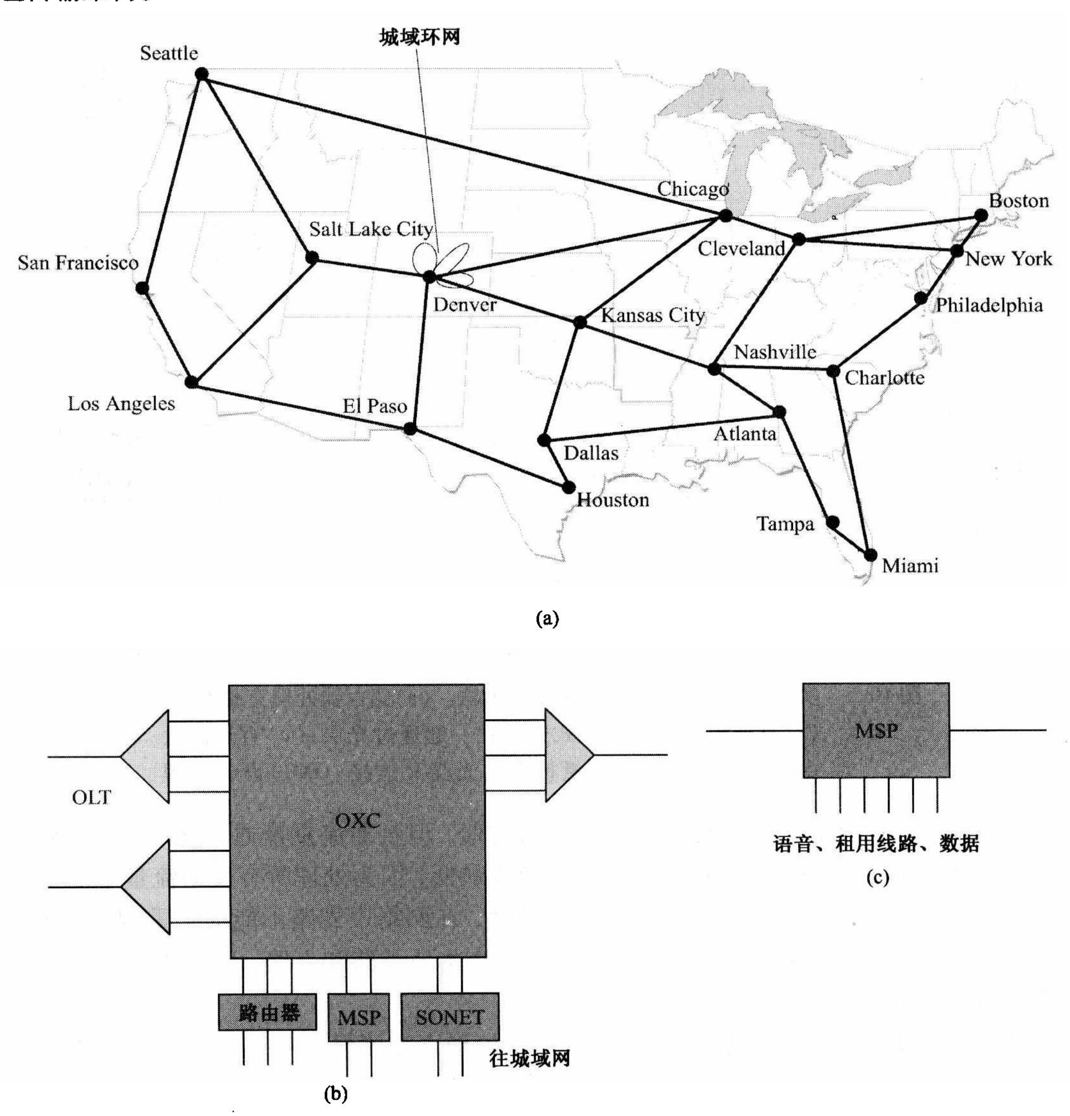


图 10.6 未来电信网络。(a)显示了一个网状长途骨干系统与城域环网的网络拓扑结构;(b)一个典型的骨干节点结构,包括OXC、OLT、IP路由器、SONET分插复用器和MSP;(c)MSP作为城域环网上一个节点。MSP被用来传送各种业务,包括语音、专线和数据业务

在网络边缘将由新一代网元提供接入，它在光层上运行并结合了低速率的统计复用和固定的类似于 SONET 的时分复用。我们称此网元为多业务平台(MSP)。通过结合时分复用和统计复用，MSP 有可能提供各种电路交换和分组交换业务到网络的最终用户。这种想法就是在网络的接入部分使用单一机箱为终端用户提供各种业务，而无须采用多个重叠网络来支持各自的业务类型。通用成帧规程(GFP)可以用在 MSP 中，使一些分组技术，如以太网、在 PPP 上运行的 IP、光纤通道(FC)、弹性分组环链路等技术，适应 SONET/SDH 或 OTN 帧结构。

多业务平台(MSP)可以用多种方式实现。这些方法的一种极端情况是，MSP 只是一个 SONET ADM，除了支持语音(DS0)和专用线路(DS1/DS3 等)外，还提供数据接口，如以太网。这种情况下，该机箱将以太网信号映射到 SONET 时隙，它纯粹是一种电路交换设备，没有统计复用功能。其他 MSP 可以利用分组交换的内核实现，这使得它们能结合统计复用与时分复用。这些机箱在将输入数据信号映射到 SONET 时隙之前完成它们的统计汇聚。最后，还有一些 MSP 完全不具备任何时分能力，照旧将所有输入的流量通过分组交换网络，如 IP。

类似与 SONET 环网一样，大多数 MSP 配置在环网结构中，并包括了内置的恢复能力，其大部分是基于 SONET 机制的。环网结构很适于城域网络，因为光纤主要敷设成环形。与使用其他配置的网络相比，如与星形(也称为中心辐射形)相比，光纤敷设成环形是经济的。星形网结构需要在每个接入节点和中心局之间设置两条不相交的光纤路由。与此相比，多个接入节点可以联合在一起接到一条单一光纤环上，其他节点也可以根据需要加入到环上，每次新节点需要增添时无须敷设新的光纤。一些 MSP 还包括内置的具有光分/插(OADM)功能的 WDM 接口。

无源光网络(PON)也正在成为潜在的候选方法，为中小带宽用户提供业务。在第 8 章中已经研究了 PON。

WDM 技术正在城域网中使用，由于其经济性不如长途网络明显，因此它被采用的速率较慢。有关这方面更多的细节可见 10.2.8 节中的内容。

10.2 传输层设计

接下来将看看，业务提供商在选择合适的传输层时必须做出的选择。历史的潮流已经要求网络增加容量，并同时驱动每比特带宽成本下降。业务提供商在规划他们的网络时一般会寻求至少增加 4 倍的容量。作为一种经验法则，他们期望用现有设备 2 ~2.5 倍左右的费用来增加 4 倍容量。

增加传输容量基本上有三种方法。

1. 第一种方法是根据需要启用另外的光纤，或配置更多的光纤。可以认为这是一种空分复用(SDM)的方法：保持传输比特率不变，但采用更多的光纤。
2. 另一种传统方法是增加光纤中传输比特率。这是一种时分复用(TDM)的方法。
3. 第三种方法是在同一光纤上增加另外的波长。这是一种波分复用(WDM)的方法。

注意，这三种技术是相辅相成的，由于各种原因，网络中都需要采用这几种方法。例如，特别是当已经敷设好的光纤接近用完时，使用 SDM 方法可视为是一种长期的基础设施建设的方法；采用 WDM 和 TDM 技术方法可视为在已有光纤基础设施上能提供迅速启动业务的能力。网络中在低速率时需要电 TDM 来梳理流量，而这时光学方法是不符合成本效益的。WDM 技术能在不同的层面扩大基础设施的容量。因此，实际上网络中几乎总是同时采用这几种技术。

一个有趣的问题是，不在于是否使用 SDM 或 TDM 或 WDM——所有这些技术都会被使用，而是要确定这些技术之间的正确组合。例如，让我们只看看 WDM 和 TDM 这两种技术。

要获得 80 Gb/s 的总容量，应该采用 32 波长、每波长工作速率为 2.5 Gb/s 的网络，还是采用 8 波长、每波长工作速率为 10 Gb/s 的网络？这是一个复杂的问题，有许多参数影响着正确的选择。什么时候应当采用更多的光纤，而不是投资于高容量的 TDM 或 WDM 系统？以下几个因素影响了这个决策过程。

- 这是建设一个新网络，还是现有网络的升级吗？如果它是升级，需要考虑在现有的系统中增加信道的成本，而不是部署新系统。
- 新增加光纤的可用性和成本。
- 可用光纤类型。
- 启用新光纤与在已经使用的光纤中增加额外容量的成本对比。
- TDM 和 WDM 设备的相对成本。

下面将尝试解决这样一些问题。在本章后面的习题中，还提供了对这些问题的部分见解。

10.2.1 采用 SDM

使用新增光纤是一种简单的升级替代。这种方法的可行性取决于几个因素。首先，新光纤可用在路由上吗？如果是的话，那么接下来就要考虑这条路由的长度。如果路由长度短(一般为几十千米)，并且不需要再生器或放大器，那么这就是一个很好的选择。但是，如果沿路由需要放大器或再生器，那么这就变成一种昂贵的方案，因为每条光纤需要一组独立的放大器或再生器。然而，如果在新光纤上采用的新设备与现用光纤上已有设备相比能够明显降低传输成本，那么采用新光纤就是非常值得的。

如果在这条路由上没有合适的光纤可用，那么需要看看敷设新光纤的相关成本。成本差别也很大。如果现有的管道中还有空闲管道，则利用空闲管道敷设光纤相对来说会廉价和快速。然而，如果路由是在一个密集的城区内，而且必须敷设新管道，那么即使距离很短，成本也是非常昂贵的。如果敷设新管道，则管道内可以放置多纤芯光缆。今天的光纤束包含有数以百计的光纤。

敷设新光纤的另一个问题是敷设过程所花费的时间。构建新的光纤链路需要几个月到几年的时间，并需要获得光纤管道所经过的市政当局的用地批准。由于挖掘街头会引起广泛的影响，在人口密集的大都市地区可能不容易获得这些施工的许可证。相比之下，采用 TDM 或 WDM 技术就可以在几天或几周内升级现有的光纤链路。虽然在某些情况下需要敷设新的光纤，但对快速响应业务请求来说这不是一种良好的途径。

请注意，运营商可能不会等到没有可用光纤后才去考虑升级。例如，当路由上最后几芯光纤被动用时，就会启动升级过程。这可能会导致沿路由器安装额外的光纤。此外，运营商可能会在最后几芯光纤中采用更高容量的 TDM 或 WDM 系统，并将低容量光纤中的流量转移到新系统中，以腾出沿路由的原有光纤。

10.2.2 采用 TDM

显然，在较低的比特率下需要 TDM 进行流量梳理，在此情况下采用光学技术不利于成本效益。问题是，流量在光纤中(也许是光纤中的一个波长上)传输前，在什么比特率下流量应

该被时分复用？当前长途链路大多工作在 2.5 Gb/s、10 Gb/s 或 40 Gb/s 比特率。在 10.2.5 节中将看到，这里所说的比特率选择主要是由可用的光纤类型来决定的。城市局之间的链路大多在 2.5 Gb/s 下运行，而接入链路甚至在更低的比特率下运行。这种情况较为复杂，在 10.2.8 节中将进行探讨。

电 TDM 技术已经可以达到 40 Gb/s 的传输速率，并在将来可达 100 Gb/s。超过这些速率，可能需要某些形式的光 TDM 技术。

在更高的比特率下，必须面对更为严重的光纤传输缺陷，特别是色散、偏振模色散(PMD)和光纤非线性。对于标准单模光纤，在工作波长为 1550 nm 附近，在 10 Gb/s 传输比特率下由于色散限制使传输距离约为 60 km，以及在 2.5 Gb/s 比特率下传输距离约为 1000 km。在实际商用发射器的情况下，传输距离更短。在存在自相位调制的情况下，10 Gb/s 下的限制可以进一步减少。除了传输距离之外，信号必须经过电再生，或必须采用某种形式的色散补偿。现今普遍商用的 10 Gb/s 的系统都使用某种形式的色散补偿。一般来说，这比使用再生器更便宜，尤其是与 WDM 技术相结合的情况下。

由于运行在 10 Gb/s 时受 PMD 影响，传输距离极限是 2.5 Gb/s 时的 1/16。在旧的光纤链路上，PMD 值可高达 2 $ps/\sqrt{km}$。假设允许 1 dB 的代价，则在该 PMD 值下计算出来的 10 Gb/s 时的距离限制约为 25 km。要传输更长距离就需要利用电再生或 PMD 补偿。PMD 引起的距离限制可能会因沿着传输路径中的接头、连接器及其他组件产生的附加 PMD 而使传输距离变得更短。在新建立的链路中，PMD 不会构成问题，因为其中 PMD 值可低至 0.1 $ps/\sqrt{km}$。

最后，自相位调制等非线性效应限制了每信道最大的传输功率，这样导致放大器之间的间距更短，从而在链路上需要更多的放大器数量，使成本略高。在 10 Gb/s 情况下，每信道的传输功率通常限制在 5 dBm 以下。

现在，10 Gb/s 的 TDM 系统已被广泛应用于长途网络中，大多与 WDM 结合使用，而 40 Gb/s的 TDM 系统将很快成为商用。

10.2.3 采用 WDM

保持适度的传输比特率可能是优选的方法，如 10 Gb/s，并在一芯光纤中有多个波长，而不是采用较少的波长，每波长运行在更高的比特率下。工作在低比特率下能使系统不容易受到色散、偏振模色散及自相位调制等一些非线性的影响。另一方面，WDM 系统中一般不适合使用色散位移光纤，因为这是四波混频所施加的限制。

WDM 系统可以设计为透明的系统。这允许不同的波长携带不同的比特率和不同协议制式的数据。在某些情况下，这可能是一个主要的优势。

最后，在网络建设方面，WDM 技术提供了极大的灵活性。例如，如果在一个网络节点中大部分流量是穿过该节点，而小部分流量是下路和上路的流量，在这种情况下使用 WDM 光分/插复用器部件比终止所有的流量并转换为电信号后再在电域进行上路/下路的方法可能更有成本效益。

目前，长途系统发展水平达到了每纤约 100 个波长，每波长工作在 10 Gb/s，再生器间距从 600 ~1500 km。超长距离系统将再生器之间的间距扩展至约 4000 km，但容量方面比长途系统有所降低。

10.2.4　单向与双向 WDM 系统

单向 WDM 系统采用两芯光纤，每个流量方向各用一芯光纤，如图 10.7(a)所示。另一方面，双向系统只需要一芯光纤，通常用一半波长向某一方向传输数据，而用另一半波长在同一光纤的相反方向传输数据。两种类型系统都在使用，各有其利弊。将比较这两种类型的系统，假设技术限制我们只能使用固定数量的波长，比如，在这两种情况下每光纤内只有 W 个波长。

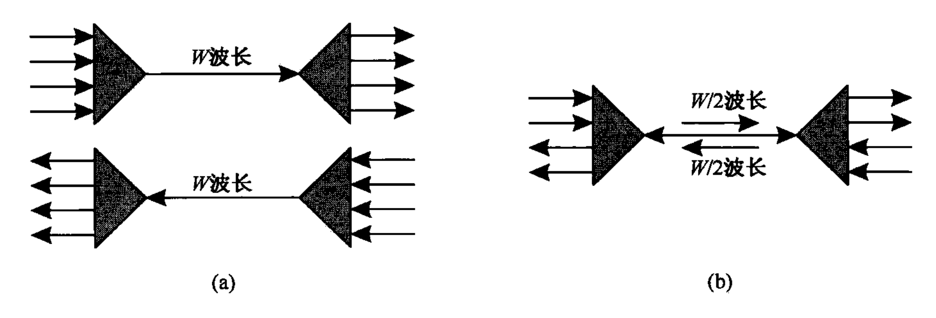


图 10.7　(a)单向传输系统;(b)双向传输系统

1. 单向系统能够通过两芯光纤处理 W 个全双工信道。双向系统在一芯光纤内处理 $W/2$ 个全双工信道。双向系统只有总容量的一半，但与单向系统相比允许每位用户渐进地增大容量。该系统可能有稍微较低的初始成本。然而，如果超过 $W/2$ 信道，则用户必须购买第二套双向系统，并同时为这额外的设备支付费用。
2. 如果只有一芯光纤可用(而不是两芯)，那么没有其他选择，只能采用双向系统。实施单向 WDM 系统 1 +1 或 1:1 配置需要至少两对单独路由的光纤，但双向系统只需要两芯光纤，如图 10.8 所示。但是请注意，如前所述双向系统提供一半的容量。

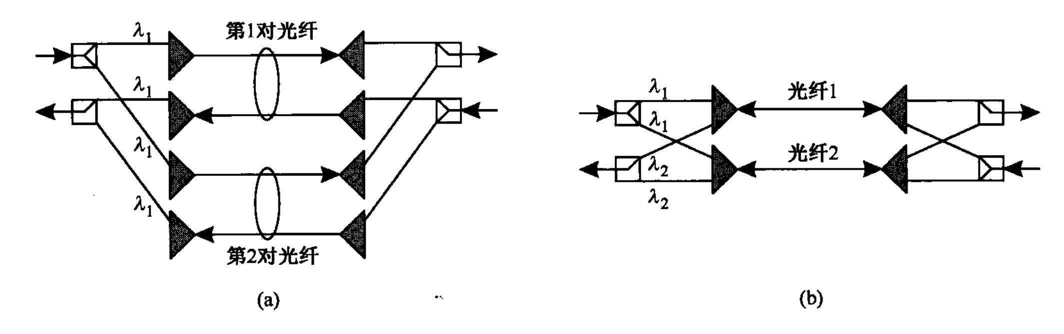


图 10.8　使用单向和双向传输系统 1 +1 保护配置。(a)使用 4 芯光纤的两个单向系统;(b)使用两芯光纤的两个双向系统

3. 采用分布式拉曼放大的系统往往是单向的。
4. 正如第 6 章中所看到的，如果光层保护是必需的，不像单向系统，双向系统在链路两端之间不需要自动保护切换(APS)协议，因为两端会同时检测光纤切换。
5. 考虑两个等价的全光网络的容量。一个网络中节点之间使用一条双向链路，每条链路上共有 W 波长。另一个网络节点之间使用两条单向链路，每条单向链路共有 $W/2$ 波

长。习题 7.10 证明了在可用容量利用效率方面双向网络比单向网络低，这是由于波长分配的效率差。

6. 双向系统可能会被配置用来处理非对称流量。如果给出光纤中波长总数量，某一方向可能比另一方向使用更多的波长。在无放大器的系统中，这样做可能很容易做到，但在有放大器的系统中却很难做到，因为通常在这些系统中每个方向都单独使用放大器。
7. 在一般情况下，设计双向传输系统稍微更难一些，因为有更多的问题需要考虑，特别是反射问题。在传输路径上使用了更多的器件，如为分离不同方向的波长使用的滤波器等，从而导致更大的损耗。然而，在信道数量多的系统中，即使是单向系统也可能需要这些滤波器。
8. 虽然双向系统的放大器可能比单向系统的放大器的结构更复杂，但它们需要处理的信道只是单向系统的一半，这意味着其中每信道可以有更大的输出功率，以及能提供更好的增益平坦度。当然，通常情况下，这是假设对每一方向使用了不同的放大器。然而，对于给定的总容量，双向系统比单向系统需要两倍的放大器。
9. 双向系统通常在相反方向传输的两套波长之间需要一段保护波带，以避免产生串扰而使性能恶化。然而，信道数量多的单向系统中也可能需要保护波带，这是由于在这些系统中复用与解复用分层特性(曾在 2.3.10 节中讨论过)。如果在两个相反的方向上使用了波长间插配置，则可以不需要保护波带，在这种情况下，在光纤中两个相邻波长的传输的方向相反。这种做法增加了额外的优势，即信道间隔有效地增加了一倍。例如，如果在光纤上传输 100 个间距为 50 GHz 的信道，则在每个方向上有 50 个间距为 100 GHz 的信道。

10.2.5 长途网络

北美的长途运营商有跨越几百千米至几千千米的链路。欧洲的链路虽然短了一些，但仍然有几百千米长。由于利用光放大器而节省了再生器的成本，以及新业务进入市场的时间使得在这些链路上采用 WDM 技术的经济效益颇为引人注目。因此，大多数长途运营商已经在其网络中广泛采用了 WDM 技术。WDM 和 TDM 的具体组合在很大程度上取决于运营商安装光纤的基础和所提供业务的类型。在主要的成熟的运营商中，AT&T 和 Sprint 主要安装了标准单模光纤。因此，WDM 技术对他们是一个有吸引力的选择，他们已经在其许多路由上积极采用了 WDM 系统。他们的大多数链路运行在 2.5 Gb/s 的比特率上(OC-48)，而不是采用 10 Gb/s(OC-192)。这是因为他们仍在使用旧的光纤设施，其中存在潜在的 PMD 问题，在这些标准单模光纤上运行 10 Gb/s 需要大量的色散补偿。另外，这些运营商大多数情况下都是提供相对较低的比特率业务，如 DS3(45 Mb/s)。OC-192 的终端最初提供低至 OC-48 速率的低速接口，但现在提供低至 OC-3/12 率的低速接口。因此，提供 DS3 业务的运营商需要购买另外的设备将 DS3 复用至 OC-12 或 OC-48，这就增加了设备的成本。

一些较新起的运营商已经建立了全球长途网络。在美国有 Qwest 和 Level 3 通信公司。当这些运营商敷设了新的光纤线路时，许多人决定安装非零色散光纤或大有效面积光纤(LEAF)。在某些情况下，他们为避免在光纤类型上遭受损失，而在管道中保留一些空闲通道，以便以后根据需要敷设其他的光纤。这些运营商大部分都以 OC-12/48/192 比特率向他

们的客户提供批量带宽。因此，他们采用 OC-192 速率的 WDM 是有意义的，那就是他们已经做的事情。

正如先前所说的，工作在 C 波段和 L 波段的系统是可用的。L 波段需要单独的放大器，比 C 波段采用的放大器相对较贵一些，这是由于 L 波段放大器与 C 波段放大器相比成本较高一些(部分原因是因为 L 波段放大器比 C 波段需要更高的泵浦功率)。虽然大多数长途运营商已经部署了 C 波段的 WDM 系统，但他们一直还在缓慢采纳 L 波段系统。这是因为在新的一对光纤上使用另一套 C 波段系统通常比在已有的 C 波段系统增加一套 L 波段系统要便宜一些。一些已经建立了新光纤网络的新的运营商，拥有大量多余的光纤并使用了这种方法。已经在网络中部署了色散位移光纤的运营商，可能想早点将 L 波段用于 WDM 系统中(以及除了 C 波段以外的其他波段)，因为在这种光纤上在 C 波段采用 WDM 技术将会受到四波混频和其他非线性的严重影响。

10.2.6 长途网络成功案例

本节介绍一个设计北美长途骨干网的例子。网络拓扑如图 10.6(a)所示。考虑常规距离长途(LH)系统及超长距离(ULH)系统。同时，也研究不同类型的保护机制的好处。

图 10.6(a)所示的网络有 19 个节点和节点间相互连接的 28 条链路。表 10.1 显示了每信道运行在 10 Gb/s 的各个节点之间的流量矩阵。端到端间的流量总计达 9.99 Tb/s。

表 10.1 长途网状网案例研究下的流量矩阵。光纤拓扑结构如图 10.6(a)所示。这个矩阵右上角的三角形表明节点对之间用10 Gb/s波长数表示的流量

节点	节点	目标节点编号																			总流量
编号	名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	Seattle	0	6	7	5	6	4	5	9	10	2	9	10	5	3	10	8	6	10	8	123
2	San Francisco	0	0	9	7	8	9	10	8	6	4	2	3	4	2	3	7	8	6	4	106
3	Los Angeles	0	0	0	3	4	5	9	4	2	9	4	5	3	10	2	3	10	2	9	100
4	Salt Lake City	0	0	0	0	6	4	2	9	7	2	6	10	2	6	4	5	6	10	2	96
5	El Paso	0	0	0	0	0	3	7	8	6	7	8	6	4	2	9	7	2	6	4	103
6	Denver	0	0	0	0	0	0	6	7	8	6	4	8	6	7	8	3	4	5	6	103
7	Houston	0	0	0	0	0	0	0	3	10	5	6	10	8	9	10	5	9	7	2	123
8	Dallas	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	2	9	4	5	3	10	2	3	4	100
9	Kansas City	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	8	9	4	2	6	10	2	3	106
10	Chicago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	10	5	6	10	8	9	10	2	108
11	Nashville	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10	8	3	7	5	9	4	103
12	Atlanta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	4	5	9	4	2	6	121
13	Tampa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	7	2	6	7	8	105
14	Miami	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	4	5	6	4	100
15	Charlotte	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	2	6	97
16	Philadelphia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	4	2	99
17	New York	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	10	112
18	Boston	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	103
19	Cleveland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90

设计过程中的第一步是端到端路由的流量，并确定所需的工作和保护的容量。实际上，会使用复杂的算法来完成该项功能，但在这项研究中使用相当简单的算法。对于 1 +1 保护，必须计算节点不重复的一对工作和保护路径，即没有任何中间节点(和链路)是共有的。这就确保在工作路径上的节点或链路发生故障的情况下保护路径起到保护作用。选择终端节点之间的最短路径作为工作路径。为了计算已知的一对终端节点间的保护路径，我们删除了这两个节点之间的工作路径上的中间节点，并在生成的拓扑结构中计算最短路径。

对于共享网状保护的情况，使用了与 1 +1 保护情况下相同的工作路径和保护路径。但是，并不需要分别给每条路径分配保护能力。相反，对受单条故障链路影响的需要重新路由的工作路径提供尽可能多的保护能力。要做到这一点，需要对每一条可能发生的链路故障计算所需的保护能力，并考虑所有可能的链路故障中最大的一个。

作为上面所讨论的路由和容量配置的结果，表 10.2 表明了设想的每条链路所需的链路距离和 10 Gb/s波长数。即使任何一对节点间所需的端到端的流量不超过30 Gb/s(3 个10 Gb/s 波长)，有几条链路超过 100 个波长(或等价超过 1 Tb/s 的容量)。例如，丹佛-堪萨斯城(Denver-Kansas City)链路超过230 个工作波长和233 保护波长(1 +1 保护的情况下)，或 120 个保护波长(共享网状保护的情况下)。在这许多链路中，最终会使用多个并行的 WDM 系统，以满足容量的需求。

表 10.2　图 10.6(a)所示的网络拓扑中的链路距离。也同时显示了在 1 +1 保护和共享网状保护下支持工作流量和保护流量的每条链路所需的波长数量，假定流量矩阵如表10.1所示

链　路	长度/km	工作容量	保护能力 1 +1	保护能力共享网状网
Seattle-San Francisco	1072	13	129	100
San Francisco-Los Angeles	535	107	35	29
Seattle-Salt Lake City	1086	76	103	49
Los Angeles-Salt Lake City	932	132	114	67
Seattle-Chicago	2731	34	119	119
Salt Lake City-Denver	601	274	83	43
Los Angeles-El Paso	1123	43	161	155
El Paso-Denver	878	64	231	110
Denver-Chicago	1438	137	80	56
Denver-Kansas City	867	230	233	120
El Paso-Houston	1053	58	213	103
Houston-Dallas	355	129	142	90
Dallas-Kansas City	699	126	154	46
Dallas-Atlanta	1133	57	130	76
Kansas City-Nashville	758	204	305	238
Kansas City-Chicago	651	78	188	88
Nashville-Atlanta	337	188	146	43
Atlanta-Tampa	644	144	91	43
Tampa-Miami	321	101	134	74
Miami-Charlotte	1027	43	192	144
Nashville-Charlotte	519	91	323	139
Charlotte-Philadelphia	707	55	220	139
Nashville-Cleveland	708	82	265	105
Boston-Cleveland	886	78	35	25
New York-Cleveland	652	149	179	67
Philadelphia-New York	143	104	171	75
New York-Boston	297	25	88	78
Chicago-Cleveland	474	267	157	128

假设在这19个节点中每一个节点都有一个或多个电核心交叉连接设备。这些交叉连接设备将在本节点终止所有流量，包括要穿过节点的流量和在本节点上路/下路的流量。因此，在这些节点上没有光域直通的流量。表10.3表示了1+1保护和共享网状保护的情况下所需的交叉连接端口数量。每个节点都需要几百个这样的端口。对于1+1保护，最大的节点是纳什维尔(Nashville)，其中有1707个端口并处理15.02 Tb/s的流量。对于共享网状保护，最大的节点是堪萨斯城(Kansas City)，它有1624个端口并处理14.12 Tb/s的流量。

表10.3 在1+1保护和共享网状保护的情况下，19个节点中每一个节点所需的交叉连接端口数量。在1+1保护下，每个上路/下路波长占用3个交叉连接端口，其中一个端口用于本地上路/下路，一个用于工作路径，还有一个用于保护路径。直通流量包括不在本地节点终止的工作和保护流量。在共享网状保护情况下，每一个上路/下路波长占用一个端口用于本地上路/下路，而另外一个附加端口用于工作路径。直通端口包括携带穿过该节点的所有工作流量的端口，以及所有为共享保护保留的端口

		1+1保护		共享网状网保护	
节　点	上/下路λ	直通λ	端口总数	直通λ	端口总数
Seattle	123	228	597	145	514
San Francisco	106	72	390	37	355
Los Angeles	100	392	692	333	633
Salt Lake City	96	590	878	449	737
El Paso	103	564	873	327	636
Denver	103	1126	1435	828	1137
Houston	123	296	665	134	503
Dallas	100	538	838	324	624
Kansas City	106	1306	1624	918	1236
Chicago	108	844	1168	691	1015
Nashville	103	1398	1707	884	1193
Atlanta	121	514	877	309	672
Tampa	105	260	575	152	467
Miami	100	270	570	162	462
Charlotte	97	730	1021	417	708
Philadelphia	99	352	649	175	472
New York	112	492	828	274	610
Boston	103	20	329	0	309
Cleveland	90	1032	1302	721	991

设计的下一步是根据全部网站所采用的设备类型和数量估算出网络成本。表10.4显示了本项研究中LH和ULH系统，以及交叉连接设备的容量和成本。

表10.5显示了支持表10.2所示的链路距离和容量所需要的不同类型的LH和ULH设备和交叉连接设备的数量。图10.9以图表的形式显示了相应的网络成本，并说明了网络的成本如何随不同的选择而变化，以及各个组件之间的成本分配。可以看到，超长距离和网状保护节约了成本。此外，在此模型中与转发器/再生器和交叉连接设备的成本相比，放大器的成本相对较低。

表 10.4　在骨干网的研究中所使用的设备的特性。所有费用都是按千美元计算。ULH 系统中的放大器和转发器与LH系统中相应设备相比成本略高，而ULH系统比LH 系统采用的波长数量较少。对于终端(包括转发器)、再生器和交叉连接设备有一个共同的设备成本，外加每个端口的成本。例如，配备10转发器的LH终端的费用是120千美元和配置两个端口的交叉连接设备的费用是57千美元

LH 系统	
每系统波长数量	80
再生器之间间隔	8 × 80 km(总共 640 km)
终端一般设备费用	30 千美元
10 Gb/s 转发器费用	9 千美元
再生器一般设备费用	30 千美元
10 Gb/s 再生器费用	15 千美元
放大器费用	30 千美元
ULH 系统	
每系统波长数量	60
再生器之间间隔	25 × 80 km(总共 2000 km)
终端一般设备费用	30 千美元
10 Gb/s 转发器费用	11 千美元
再生器一般设备费用	30 千美元
10 Gb/s 再生器费用	19 千美元
放大器费用	36 千美元
交叉连接设备	
10 Gb/s 端口数量	128
一般设备费用	45 千美元
每 10 Gb/s 端口费用	6 千美元

表 10.5　在 1 + 1 保护和共享网状保护情况下，LH 和 ULH 系统为实现表 10.2 所示的容量和链路距离所需的放大器、转发器、再生器及交叉连接设备的数量

设　备	数　量			
	1 + 1 保护		共享网状保护	
	LH	ULH	LH	ULH
放大器	876	1219	711	993
波长转发器	15 020	15 020	11 268	11 268
终端一般设备	198	263	153	202
再生器	5621	153	4305	153
再生器一般设备	80	3	65	3
交叉连接端口	17 018	17 018	13 274	13 274
交叉连接一般设备	143	143	110	110

请注意，在 1 + 1 保护和共享网状保护两种情况下都使用了交叉连接设备。交叉连接设备对共享网状保护的情况是重要的，因为正是它们提供了这种保护能力。但是，在1 + 1保护情况下，可以通过转发器直接实现这种保护功能，而不必为此使用交叉连接设备。在中间节点的直通连接可以使用人工配线盘进行接插。然而，如果在提供端至端连接时具备充分的灵活性，则在这两种情况下都需要交叉连接设备。

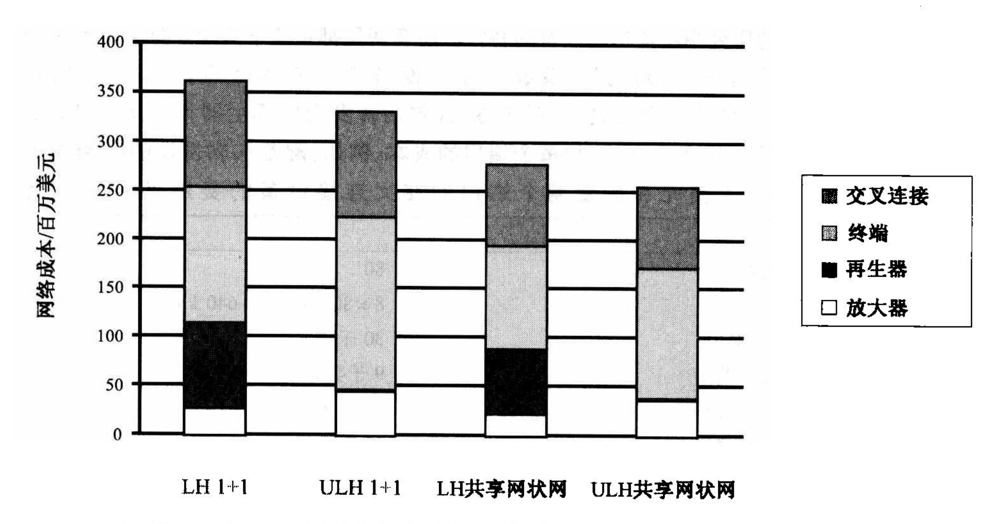


图 10.9　在 1 +1 保护和共享网状保护下 LH 和 ULH 系统的网络成本分析

研究结果在很大程度上取决于不同类型设备的相对成本和能力，以及所使用的路由算法。例如，假设 ULH 系统的放大器和转发器的成本相对于 LH 系统相应的设备成本稍微高一些，而在每个系统的波长数量上略少。如果相对成本改变了，则研究结论可能改变相当大。图 10.10 画出了 LH 和 ULH 系统的相对成本随转发器(和再生器)和放大器的相对成本的函数关系。

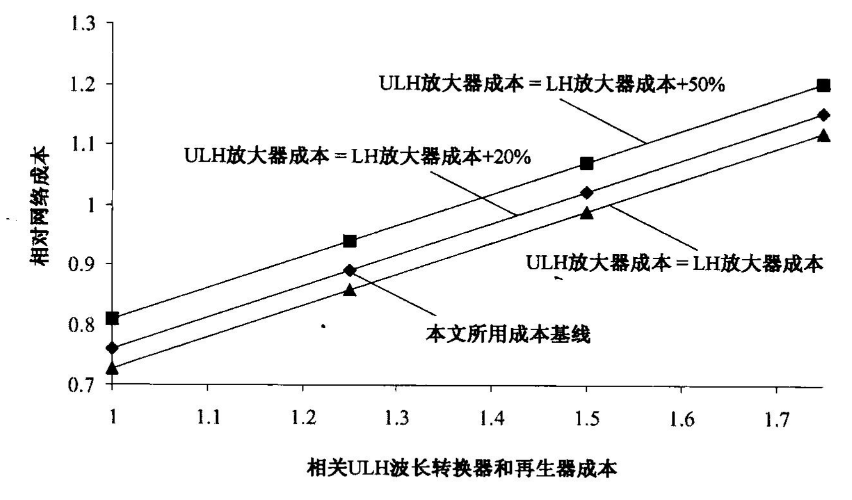


图 10.10　研究结果表明了对 ULH 与 LH 系统转发器(和再生器)和放大器的相对成本的敏感度。x轴表示ULH系统转发器和再生成本相对于LH系统转发器和再生器成本的比值。y轴表示ULH系统和LH系统在1 + 1保护下的相对网络成本

现在只触及一些影响网络设计的问题。如果需要设计一个更为现实的网络，一些其他因素需要考虑。

- 可以在较短链路上利用 LH 系统，而在较长链路上利用 ULH 系统，这样可以进一步优化成本。
- 许多系统在中间节点采用了具有直通信号能力的光域上路/下路设备，而不需要终止

所有波长信号。此项能力可去除一些用来终止直通流量的转发器，从而降低节点成本。在这种情况下，还必须处理第 7 章中讨论过的路由和波长分配问题，因为直通光信号不能转换到其他波长。本章习题中有一道习题给出了将电交叉连接设备与具有直通光信号功能的 OXC 进行比较的例子。比较的是转发器的数量、成本和占地空间方面。

- 使用更复杂的路由和容量分配算法都能使 1 +1 保护和共享网状保护的成本下降。
- 已将网络成本与路由和容量分配成本分开考虑。然而，将两部分结合起来考虑可进一步优化成本。例如，在 LH 的情况下，可能会选择稍长一点的路径，这样可以在路径中的一些链路上使用较少的再生器。
- 当使用交叉连接设备时，没有考虑产生阻塞的成本。当考虑使用 1.28 Tb/s 的交叉连接设备时，看到许多节点需要不止一套交叉连接设备。原来的分析中只是简单地根据为获得所需的端口数量需要多少交叉连接设备，而没有考虑交叉连接设备的成本或阻塞产生的成本。
- 没有明确说明在客户端设备(如路由器)和光层设备(如交叉连接设备)之间没有保护。实际上，在该处同样需要有一定的保护，并计入其成本因素。
- 只考虑了 10 Gb/s 的流量需求，没有考虑处理汇聚和梳理较低速率时的需求。

10.2.7　长途海底网络

长途海底链路的经济性与长途地面链路相似，但有几个细微的差别。首先，通常采用的海底链路有几种类型。一种类型是跨越数千千米，横跨大西洋或太平洋将北美与欧洲或亚洲相互连接，如图 10.11 所示。另一种类型往往是相对较短的跨度(几百千米)，通过彩穗型或直接穿过一段短的水域将一些国家相互连接在一起。彩穗型是指将两点之间的光纤连接成一个弧形。这种情况是指用海底光缆连接没有被水分离、通常是邻国的两个地方。一种主干和分支的配置也很普遍，其中海底主干光缆用于沿途几个国家。每个国家都通过分支光缆连接到主干光缆上，在分支单元上通过无源光器件实现分接。如果分支光缆被切断，某一国家的接入将会中断，但其他国家可以继续通过主干光缆通信。WDM 技术被广泛应用在所有这些类型的链路上。

长途海底系统往往运行于技术前沿，并且必须克服巨大的障碍以达到涉及的距离。链路采用了色散管理技术，即沿传输路径交替使用正色散光纤和负色散光纤，以实现总色散为零，但同时又在沿路径的任一点上都有有限的色散。

较短距离的海底链路还延长了设计目标，但是以不同的方式。这些链路的主要目标是消除任何海底放大器或中继站，由于它们具有相对较高的安装和维护成本。因此，这些系统使用了相对较高功率的发射机。

主干和分支的结构也在不断发展。早期的分支单元中包含了无源分束器和合束器，但现在正在使用光分/插复用器，在不同地点选择特定波长进行光上路或下路。

海底系统被设计成可以提供非常高水平的可靠性和可用性，因为网络故障部分维修或更换的成本高。冗余泵浦设计的光放大器已被证明是高度可靠的设备，其故障率比电再生器低得多。同样，使用无源波分复用器件的光分/插复用器已在海底分支配置中使用是合格的。

建立海底网络是非常昂贵的，这些网络容量在许多用户之间共享。波分复用技术允许来自不同用户的流量分离到不同的信道传送——这是一项有用的功能。

海底链路和地面链路之间的一个关键的区别是，在大多数情况下，海底链路一开始就采用新光纤，而不是建立在现有光纤设备上。升级一套已存在的长途放大的海底链路是罕见的，因为敷设一套新链路的成本并不比升级已有链路的成本明显高多少。这在设计选择方面提供了更多的灵活性。

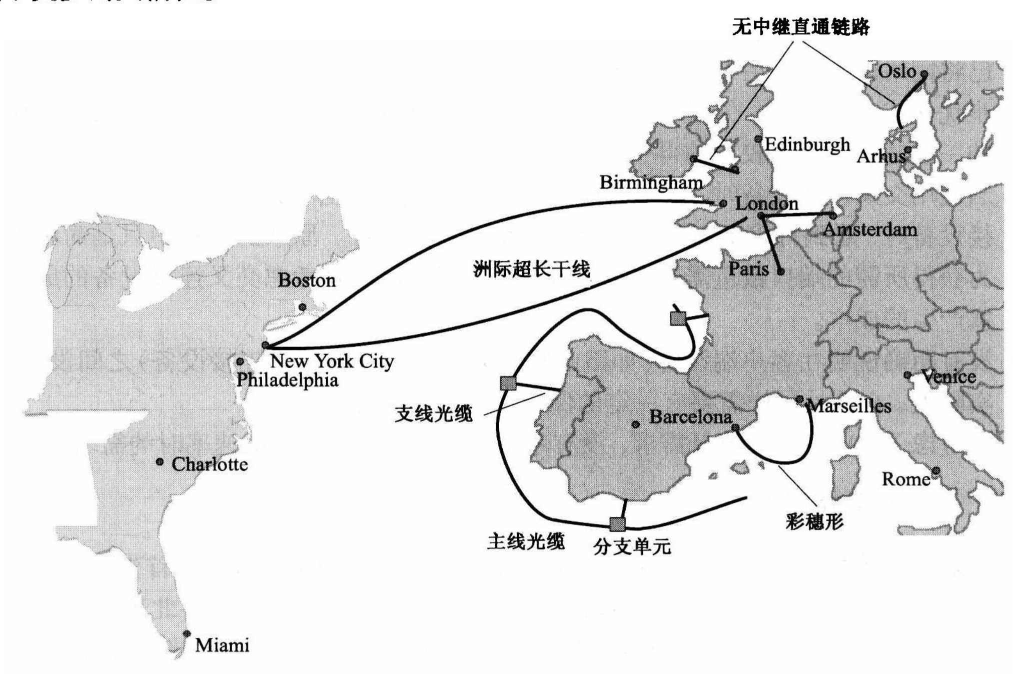


图 10.11　不同类型的海底网络，呈现了两条超长距离的跨大西洋链路、几条短跨度直接无中继链路、一种主干和分支配置，以及一种彩穗形配置

10.2.8　城域网

城域网可以分成两部分。第一部分是城域接入网，从运营商的中心局到运营商的客户位置，汇集客户的流量并送入网络。该种网络的第二部分就是城域局间网——运营商中心局之间的那部分网络。现在的接入网通常由几千米到几十千米直径的环形组成，流量主要汇集到中心局。局间网往往是站点之间几千米到几十千米的范围，流量较趋分散。

由于涉及间距较短，WDM 链路的情况在城域网中不太引人注目。许多情况下使用其他替代方案，如使用多芯光纤或使用更高速率的 TDM 技术是相当可行的。然而，OC-192 没有广泛应用到城域网中。原因之一是 OC-192 的接口最近才应用到地域系统。另一个原因是这部分网络的运营商都对 DS1(1.5 Mb/s)或 DS3(45 Mb/s)的低速业务感兴趣，以及 OC-192 设备只是现在才成为这种应用的一种有成本效益的替代方案。

另一方面，除了纯容量增长的因素外，还有一些其他原因正在驱使这些网络中采用 WDM 技术。城域网运营商需要为其客户提供各种不同类型的连接。业务组合包括了租用专线业务和统计复用类型的业务，如 IP、以太网、千兆以太网和光纤通道等。在许多情况下，这种业务组合得到了一组重叠网络的支持，其中每种网络专门支持一种不同的业务。这些重叠网络利用单一的基础设施得以完美实现。由于 WDM 网络的透明性性质，这种网比其他大多数网络，如 SONET/SDH，能提供更好的基础设施。

另一个因素是城域网中流量分布的变化比长途网络中迅速得多。这就驱动了能够根据需要快速、高效地重新配置网络容量的需求。可重构的 WDM 网络能够以有效的方式按需提供容量。

在城域网中采用 WDM 技术的一个大的驱动力是大型企业需要将其数据中心相互连接。这些数据中心相距几千米到几十千米。所有业务都反映在这两个站点之中。这使得企业的中心之一出故障时能迅速从事故中恢复。可能还有一些其他原因使数据中心不在一处，如某地的房地产成本比另一个地方要低。外围设备(如大容量磁盘设备)可放置在较便宜的站点。这样应用的带宽需求是很大的。这些数据中心的大型主机需要几百个信道互连，每个信道速率高达数吉比特每秒。通常情况下，这些数据中心往往设置在密集的大都市地区，这些地区已安装的光纤的大部分都已在使用中。此外，这些网络中使用了各种各样的协议和比特率。这两个因素使 WDM 技术成为这些类型网络有吸引力的选择。这些网络有时也被称为存储区域网(storage-area network)。这是现在城域网中采用的大多数 WDM 网络的主要应用。

由于流量的性质和这些网络中有大量的直通流量，采用有光分/插复用器的 WDM 环形网代替更高速率的 TDM 环网能够成为有说服力的方案。在 10.2.9 节中提供了一个详细的城域接入网案例研究。

尽管城域网络跨度较短，但有以下几个原因说明城域网中可能仍然需要光放大器。

1. 虽然跨度很短，但在许多情况下地面敷设的光纤是旧的，在其路径中有许多连接器，因而具有相对较高的损耗。例如，一个 10 km 长的城域网链路可能有高达 10 dB 的损耗。
2. 损耗不只是来自光纤跨度，很大一部分来自于光分/插复用器的损耗，其中每一个都可以增加几分贝的损失。
3. 最后，对保护的要求驱动了对备用光纤跨度的需求，它可能比工作光纤跨度更长(例如，围绕一个环)。

在撰写本书时，城域网中适应企业应用的专用 WDM 链路已被广泛采用。美国的一些运营商已将 WDM 技术应用于其城域网上，但许多人仍在考虑 WDM 技术与这部分网络的其他替代方案的相对利益。因此，WDM 技术尚未像它在长途网络中的应用那样普及。

10.2.9 城域环网案例研究

现在来看看将城域环网升级的一个详细例子。考虑一个 4 节点的接入环网，3 个远程节点节以枢纽节点为中心。为简单起见，假设所有的流量都集中在枢纽节点和远程节点之间，远程节点本身之间没有流量。起初有一个运行在 OC-48(2.5 Gb/s)的 SONET 环网。假设这个环网的容量耗尽，并且沿环没有多余的光纤。现在，有两种不同的提升环网容量的方案。第一种选择是将环网升级到下一个更高的速率 OC-192(10 Gb/s)。这需要在所有 SONET 节点上更换或升级分/插复用器(ADM)。

这是一种 TDM 升级途径。另一种方法是引入 WDM 技术，并在同一对光纤的不同的波长上建立多个“虚拟”环网。可以按下列渐进步骤进行，一次增加一个环网。例如，如图 10.12 所示，开始可以以不同的波长将一个远程节点(这个节点需要更大的容量，假设为节点 1)连接到枢纽节点，建立起另一个环。为了实现这一点，需要在每个节点上引入 WDM 光分/插复

用器(OADM),以便下路相应的波长。这些有可能是“稀疏”OADM, 因为很可能原来的环网工作在1310 nm波长上, 我们会在1550 nm WDM窗口增添新的环网。如果节点1想将另一个OC-48的容量输入到枢纽节点, 则还需要在节点1和枢纽节点增添SONET ADM, 例如, 选择它们运行在OC-48的速率上。请注意, 在这种情况下, 只需添加两套SONET OC-48的ADM。可以如图10.13所示继续用这种升级路径来添加更多的光纤环。随着更多的光纤环被增添, 需要在这些节点上采用另外一种“密集”OADM, 以分离出1550 nm波长窗口内的不同波长。

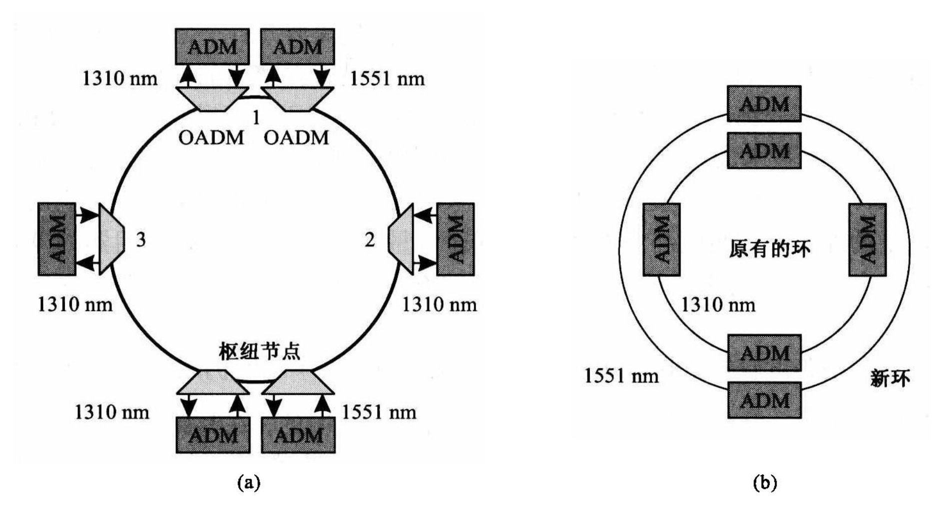


图10.12 利用WDM技术升级4个节点的接入环网。在不同的波长上增加了另外一个光纤环。(a)物理拓扑;(b)表明SONET的ADM之间连通性的光路拓扑结构

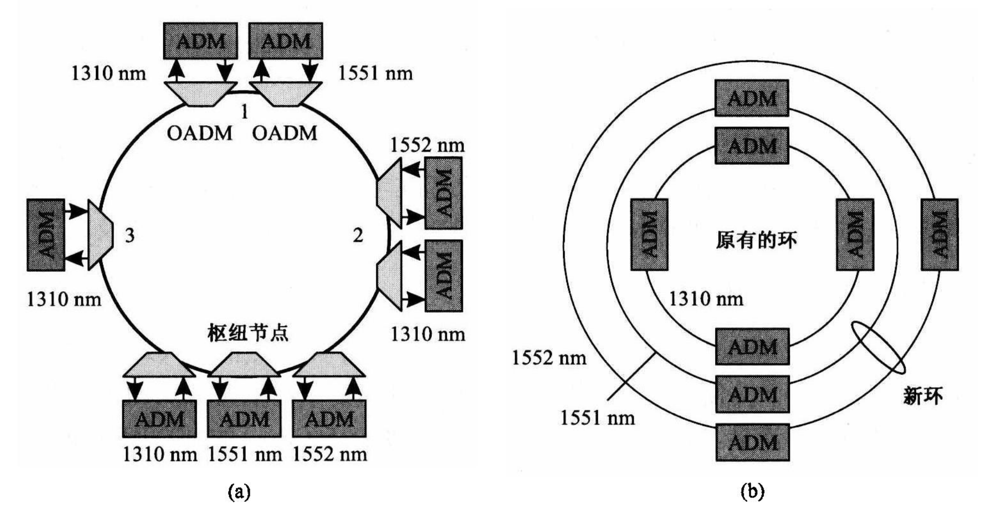


图10.13 由图10.12持续升级的过程。两个额外的环在不同波长上添加至基本配置。(a)物理拓扑;(b)表明SONET的ADM之间连通性的光路拓扑结构

与TDM方案相比,在WDM方案下要注意的关键一点的是现有的SONET设备可以继续保留, 而需要增加容量的节点只需添加额外的(SONET)硬件, 这种情况可能需要较少的前期资金费用。

WDM 技术在处理非 SONET 协议和新协议方面具有灵活性，有能力给每种协议提供其自己的一套波长。此外，正如已经看到的那样，当波长容量已满时，可以增添相同或更高比特率的另外的波长。因此，WDM 解决方案与 TDM 解决方案相比，更多的是“面向未来”的。

留下的没有解答的关键问题是如何从成本角度比较这两种方法。这在很大程度上取决于 OADM 相对于 SONT ADM 的成本。表 10.7 表明了这个例子中网络升级的成本，假设设备成本如表 10.6 所示。在表 10.7 中，“OC-192 TDM 环”是指在所有节点上用同样 1310 nm 波长的 OC-192 ADM 替换 ADM 的 TDM 解决方案的成本。表中“N 个 WDM OC-48 节点”是指 WDM 解决方案的成本，这时 N 个节点用新的 OC-48 连接到枢纽节点进行升级，并且每个这样的连接都用它自己的波长。请注意，所有节点都有稀疏 WDM OADM，以及 N 个升级节点中的每一个都有新的 OC-48 ADM。此外，枢纽节点也有 N 个新的 OC-48 ADM。在这种设备成本的假设下，WDM 解决方案是较便宜的。

表 10.6　城域环网升级的设备成本假设

设　备	无 WDM 接口的费用/美元	有 WDM 接口的费用/美元
OC-48 ADM	60 000	80 000
OC-192 ADM	175 000	
稀疏 OADM		10 000

表 10.7　在表 10.6 假设条件下，城域环网的升级成本

升　级	成本接口/千美元
OC-192 TDM 环	700
1 个 WDM OC-48 节点	200
2 个 WDM OC-48 节点	360
3 个 WDM OC-48 节点	520

10.2.10　从不透明链路到灵活的全光网络

光层本身是不断变化的，不只是在原有容量方面，而且也包括功能方面。光网络最初包括 WDM 链路，并在链路端电域实现所有功能。这些网络有时也被称为不透明网络(opaque network)。由于光-电(O/E)转换成本高，特别是在较高的比特率下，因此尽量减少网络中的这些转换器数量是有意义的。在这个方向迈出的第一步是发展超长距离系统，该系统能使再生器之间的间隔更长。第二步是在光域将尽可能多的流量直通过一个节点。全光 OADM 或 OXC 可完成此项功能。考虑到 O/E 转换器的成本占据节点本身成本的主要部分，用光直通方法替换电处理方法可节省成本达一个量级。对于与之相关的节省能源和减小占地空间，这是考虑到 O/E 器件消耗了 WDM 设备的大部分电力，并占据了其大部分占地空间。如果以波带形式而不是逐个波长形式将信号直通过节点，则还可以进一步节省成本。这些网络被称为全光或透明网络(all-optical 或 transparent network)。

光层发展的下一步是增加灵活性。灵活的网络能按需建立和拆除光路，并允许运营商快速配置和部署业务。这可以用光交叉连接和可重构的光分/插复用器来实现。

尽管全光网络提供了明显的优势，但它也有其局限性。某些功能，如波长转换、再生，以及在细粒度(如在 STS-1 或 51 Mb/s)的流量梳理方面将需要在电域完成。正如在第 7 章中

所看到的，由于网络中在如何梳理流量方面效率低下，因此不可能完全在光域中处理所有直通流量。基于这些原因，实际的节点最终将使用全光和电的交叉连接设备相结合的方法。全光交叉连接设备将尽可能多地在光域交换直通信号，至于信号再生、从一个波长转换到另一波长或梳理等方面的处理，将在电层进行。

全光网络的另一微妙方面来自多个厂商系统之间的互操作性。正如在第5章中所看到的，来自不同供应商的设备在波长层面上是很难互操作的。厂商之间的互操作性需要通过再生器/转发器来实现。这意味着全光网络本身是一个单一供应商的网络。在网络边缘，需要用波长转发器来实现与其他全光网络的互操作性。因此，一个真实的网络将由全光岛或子网组成，通过边界的波长转发器来实现与其他子网的互连。

总结

本章着重讨论了新一代运营商网络的结构方案。这些网络与基于SONET/SDH建立的传统网络不同。这些设计受数据业务超过语音业务的现象的驱动，也受能以非常不同商业模式提供不同类型业务的新一代运营商的出现的驱动。一个提供混合业务的成熟运营商可以选择在光层上运行SONET/SDH和IP/MPLS或以太网。主要提供面向数据业务的运营商可能选择采用IP/MPLS或以太网直接在光层运行，完全不采用任何SONET/SDH设备。光层在长途网和城域网络中变得无处不在。这里的光层为上层提供电路交换的光路。需要注意的是，光层不执行任何分组交换功能。这些功能最好留给电层。光分组交换技术仍然处于实验室研究阶段。

下一代城域接入网将使用混合分组-电路的网络单元作为关键单元提供业务。网络的核心正在从基于SONET的环网架构转移至基于网状的光层的基本架构，并在光层或客户层实现保护功能。

光层内，TDM、WDM和SDM都用来提供容量。这些技术的正确组合不是那么容易选择的，取决于多种因素，包括链路长度、空闲光纤的可用性、光纤的类型及其色散和非线性特性，以及在网络中采用的业务类型等。本章的习题会让读者知道这样的比较可能涉及哪些方面。网络规划者需要对不同的选择做出自己的分析，或许借助于一些网络规划和设计工具来决定朝哪个方向走。

光层本身正在从不透明的网络、包含在链路终端需要进行电处理的WDM链路，转向全光网络，其中流量可以在光域直通过中间节点。与此同时，光网络正在从静态网络转向灵活的网络，其中光路可以按需建立和拆除。

进一步阅读材料

本章的题材广泛存在于商业出版社和投资公司。一些市场研究公司发布了光网络行业中的有关各个环节的报告。它们包括通信行业研究者(www.cir-inc.com)、Electronicast公司(www.electronicast.com)、Ovum公司(www.ovum.com)、先锋咨询公司(www.pioneerconsulting.com)、Strategies Unlimited公司(www.strategies-u.com)和Yankee集团(www.yankeegroup.com)。已经发表了许多有关各种体系结构的相对经济分析研究成果。要注意，这些意见有些偏颇。所做出的假设显著影响了结果，并且这些假设通常偏向于进行这些研究的供应商所提供的产品。

在文献[Sim08]中有网络设计方法和注意事项。已在多篇论文中探讨了支持 IP over WDM 的各种选择；例如，文献[Mae00]提供了一个相对的成本分析。有关城域 WDM 经济分析的典型论文请见文献[PCW+00，Coo00，OSF00，PCK00]等。文献[DSGW00，Dos01]探索了超长距离 WDM 系统背后的价值主张。国家光纤光学工程师会议(The National Fiber Optic Engineers' Conference)通常有许多关于这些主题方面的论文。

习题

10.1　设想你是为长途运营商计划采用 IP over WDM 网络的规划师。你的任务是选择合适的技术，并为你的网络选择供应商。你获得以下信息。最初的要求是在两个节点之间采用 20 Gb/s 的容量。你预计这种容量将在今年内增长到 80 Gb/s，并且在几年内增长到 320 Gb/s。你有以下几种来自不同供应商的具有不同价格和功能的 WDM 系统的选择。

供　应　商	A	B	C
信道数	80	128	32
每信道比特率	OC-192	OC-48	OC-192
再生器之间距离	640 km	1920 km	1920 km
放大器间隔	80 km	80 km	80 km
OLT 一般设备	40 000 美元	43 000 美元	60 000 美元
波长转发器	10 000 美元	5 000 美元	16 000 美元
放大器	30 000 美元	20 000 美元	25 000 美元

假设光线路终端一般设备价格包括任何需要的放大器。在每一链路终端处每个信道都需要一个波长转发器。再生器之间的距离一旦超过规定指标，则信号需要使用两个带波长转发器的背对背的终端进行再生。

计算出 640 km、1280 km 和 1920 km 链路的每种解决方案的成本。绘制每种方案的结构配置图。你有什么结论？除了上述计算的成本外，有什么其他因素可能会影响你的选择吗？

10.2　考虑与习题 10.1 同样的问题，但有一点区别。在 1280 km 和 1920 km 的情况下，两个节点之间有第三个节点，其与第一个节点的间距是 600 km，并且该节点一半的容量用来下路和上路。对于这种情况，假设供应商 B 和供应商 C 提供系统，其中你可以在这个中间节点的直通信道使用背对背终端而不需要转发器。(在上路/下路信道仍需要转发器。)重复你的分析。你有什么结论？

10.3　设想你是城域网运营商的规划师。你的网络链路相当短，最大跨度为 40 km。为了实现两节点链路，请比较一下并对 SDM、TDM 和 WDM 技术进行选择。假设费用如下。

设　　备	成本/美元
在已有管道中放置光纤(每 km)	300
敷设新的管道，包括放置光纤(每 km)	20 000
OC-48 BLSR/2 ADM 一般设备	40 000
每增加一条 OC-12 下路	5000
每增加一条 STS-1 下路	750
OC-192 BLSR/2 ADM 一般设备	125 000
每增加一条 OC-12 下路	5000
OC-12 BLSR/2 ADM	15 000
每增加一条 STS-1 下路	750
城域网 WDM 终端(OLT)一般设备	30 000
每增加一个波长转发器	10 000

你需要以 OC-12(622 Mb/s)的速率提供 10 Gb/s 的容量给你的客户。请在已有可用光纤、光纤需要在已有管道敷设及需要在新管道敷设这几种情况下，比较下列选择时的费用：(a)在各条光纤上安装 OC-48 ADM；(b)与一对光纤上的 WDM 终端联合使用 OC-48 ADM；(c)OC-192 ADM；(d)没有 SONET 设备的 WDM 终端。

同样还考虑用于保护的成本因素。假设两个站点之间有两个不同路由的光纤对。无论什么时候使用 SONET，保护都在 SONET 内进行，而在 OLT 内无保护。在没有 SONET 设备的情况下，保护是在光复用段由 OLT 进行的——假设成本已经计入到了 OLT。

在以 STS-1 的形式提供容量给你的客户的情况下再考虑这个问题。在这种情况下，你可用的选择是：(a)在各条光纤上运行 OC-48 ADM；(b)与一对光纤上的 WDM 终端联合使用 OC-48 ADM；(c)OC-192 的 ADM 后接 OC-12 ADM；(d)WDM 终端后接 OC-12 ADM。

画出不同配置的图。你有什么结论？除了上述计算的费用外，还有什么其他因素可能会影响你的选择？

10.4 这是前面涉及规划城域网问题时的延续。将在这个问题上探讨使用光分插复用器的问题。现在你可建立一个 A、B 和 C 三个节点的线性网络。节点 A 和节点 B 之间的链路是 40 km，节点 B 和节点 C 之间的链路也是 40 km。你需要在节点 A 和节点 B 之间具有 5 Gb/s 的传输容量，在节点 B 和节点 C 之间也具有 5 Gb/s 的传输容量，而在节点 A 和节点 C 之间需有另外的 5 Gb/s 的传输容量。所有传输容量都通过 OC-12 发送。除了以上提供的设备外，你也可以在节点 B 使用 OADM，与节点 A 和节点 C 的 OLT 一起工作。WDM 系统可以传输 80 km 距离，中间设有一个 OADM。OADM 有一个共同的设备成本为 40 000 美元，包括任何所需的放大器在内，并能根据需要下路多个波长。上路和下路信道需要转发器。

此外，假设 SONET ADM 最长可传输 40 km。超过此距离信号需要再生。再生器的费用如下：OC-48再生器为 5 000 美元；OC-192 再生器为 15 000 美元。

现在考虑以下解决方案：(a)有可用光纤，并使用 OC-48 ADM。在这种情况下，你在节点 B 需要一个再生器供直通流量使用，或者需要另外一个 OC-48 ADM 来复用和解复用本地流量。请再考虑光纤需要置入现有管道，以及现有管道已经布满光纤的情况；(b)OC-48 ADM 与 OLT 和 OADM 一起使用；(c)利用 OLT 和 OADM 直接传送 OC-12，没有 SONET 设备。(d)OC-192 ADM 和在节点 B 与另一个 ADM 一起使用，以解复用和复用本地流量。

在这个问题中不考虑任何所需的保护。请注意，这可能会使设备更便宜，但对我们而言，假设设备费用没有改变。

比较这些方案的成本。你得出什么结论？

10.5 你正在考虑在运营商网络的大型节点中采用光交叉连接设备。该交叉连接设备被连接到 OLT 并将流量下路到 IP 路由器。你可以有三种选择：(1)电交叉连接(EXC)解决方案，其中交叉连接利用连接到 OLT 设备中转发器的短距离接口和连接到路由器上的短距离接口；(2)不透明的光交叉连接解决方案，其中光子交叉连接(PXC)被连接到 OLT 设备上的转发器和路由器上的短距离接口；(3)透明的光交叉连接解决方案，其中光交叉连接设备直接连接到 OLT 设备，不需要转发器，但转发器用于路由器和交叉连接设备之间。

以下假设：

项　目	成本/美元	功率/W	规　格
WDM OC-48 波长转发器	4 500	75	64 端口/每机架
WDM OC-192 波长转发器	9 000	150	32 端口/每机架
EXC 开关结构		10 000	1 机架
EXC OC-48 端口	3 000	50	256 端口/每机架
EXC OC-192 端口	6 000	100	64 端口/每机架
PXC 端口	4 500	2	256 端口/每机架

假设 EXC 支持最大 512 个 OC-48 端口或 128 个 OC-192 端口，而 PXC 支持 1024 个端口。

比较下列情况下上述三种选择的成本和占地空间。(包括使用的任何转发器，但不包括路由器，因为它们在所有情况下是共同的。)总结你的调研结果。

(a) 节点交换来自 WDM 系统的 256 个 OC-48 的波长，其中 25%、50% 或 75% 的流量可能本地下路到路由器端口。(例如，下路了 25%，你总共需要交叉连接上 320 个端口。)

(b) 节点交换来自 WDM 系统的 256 个 OC-192 的波长，其中 25%、50% 或 75% 的流量可能本地下路到路由器端口。

参考文献

[Coo00] H. K. Cook. The economics of metro DWDM deployment. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[Dos01] B. Doshi et al. Ultra-long-reach systems, optical transparency and networks. In *OFC 2001 Technical Digest*, 2001. Paper TuG4.

[DSGW00] A. Dwiwedi, M. Sharma, J. M. Grochocinski, and R. E. Wagner. Value of reach extension in long-distance networks. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[Mae00] Y. Maeno et al. Cost comparison of an IP/OTN integrated node against a pure IP routing node. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[OSF00] G. Ocakoglu, K. Struyve, and P. Falcao. The business case for DWDM metro systems in a pan-European carrier environment. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[PCK00] G. N. S. Prasanna, E. A. Caridi, and R. M. Krishnaswamy. Metropolitan IP-optical networks: A systematic case study. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[PCW+00] V. Poudyal, R. H. Cardwell, O. J. Wasem, J. E. Baran, and A. Rajan. Comparison of network alternatives for transporting high capacity tributaries for IP router interconnection. In *Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference*, 2000.

[Sim08] J. M. Simmons. *Optical Network Design and Planning*. Springer, New York, NY, 2008.

附录A 缩 略 语

1R	Regeneration without reshaping or retiming	不重整波形和不重定时的再生
2R	Regeneration with reshaping but no retiming	重整波形但不重定时的再生
3R	Regeneration with retiming and reshaping	重整波形和重定时的再生
AAL	ATM adaptation layer	ATM 适配层
ACTS	Advanced communications technologies and services	高级通信技术和业务
ADM	Add/drop multiplexer	分插复用器
AGC	Automatic gain control	自动增益控制
AIS	Alarm indication signal	告警指示信号
ANSI	American National Standards Institute	美国国家标准学会
AON	All-optical network	全光网
AOTF	Acousto-optic tunable filter	声光可调谐滤波器
APON	ATM passive optical network	ATM 无源光网络
APD	Avalanche photodetector	雪崩光电二极管
APS	Automatic protection switching	自动保护倒换
AR	Anti-reflective	消反射
ASE	Amplified spontaneous emission	放大的自发辐射
ASON	Automatic switched optical network	自动交换光网络
ASTN	Automatic switched transport network	自动交换传送网
ATM	Asynchronous transfer mode	异步传输模式
ATMOS	ATM optical switching	ATM 光交换
AWG	Arrayed waveguide grating	阵列波导光栅
B-DA	Backbone destination address	骨干网目的地址
B-SA	Backbone source address	骨干网源地址
B-Tag	Backbone tag	骨干网标签
BCH	Bose-Chaudhuri-Hochquenghem (code)	BCH 码
BDI	Backward defect indicator	后向故障指示器
BEI	Backward error indicator	后向错误指示器
BER	Bit error rate	误码率
BIAE	Backward incoming alignment error	后向输入定位故障
BLSR	Bidirectional line-switched ring	双向线路交换环
BPDU	Bridge protocol data units	桥协议数据单元
BPON	Broadband passive optical network	宽带无源光网络
C-DA	Customer destination address	客户目的地址
C-SA	Customer source address	客户源地址
C-Tag	Customer tag	客户标签
CBR	Constant bit rate	恒定比特率
CCM	Continuity check message	连续检测消息
CGM	Cross-gain modulation	交叉增益调制

CIR	Committed information rate	约定信息速率
CLP	Cell loss priority	信元丢弃优先级
CMIP	Common management information protocol	公共管理信息协议
CO	Central office	中心局
CORBA	Common object request broker	公共对象请求代理
CORD	Contention resolution by delay lines	延迟线竞争解决法
CPM	Cross-phase modulation	交叉相位调制
CRC	Cyclic redundancy check	循环冗余校验
CR-LDP	Constrained-based routing label distribution protocol	基于被约束路由标签分配协议
CRO	Contention resolution optics	用于消除竞争的光学方法
CSMA/CD	Carrier sense multiple access/collision detection	载波感知多址接入/碰撞检测
CW	Continuous wave	连续波
DA	Destination address	目的地址
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	(美国)国防部高级研究计划署
DBA	Dynamic bandwidth allocation	动态带宽分配
DBR	Distributed Bragg reflector	分布布拉格反射器
DCE	Dynamic channel equalizer	动态信道均衡
DCF	Dispersion compensating fiber	色散补偿光纤
DCN	Data communications network	数据通信网
DCS	Digital crossconnect system	数字交叉互连系统
DFB	Distributed feedback	分布反馈(激光器)
DGD	Differential group delay	差分群时延
DM	Direct modulation	直接调制
DPRing	Dedicated protection ring	专用保护环
DSB	Double sideband	双边带
DSF	Dispersion-shifted fiber	色散位移光纤
DSL	Digital subscriber line	数字用户线
DTMF	Dielectric thin film multicavity filter	介质薄膜多腔滤波器
DWDM	Dense wavelength division multiplexing	密集波分复用
E-LAN	Ethernet-LAN	局域以太网
E-Line	Ethernet-line	线形以太网
E-TREE	Ethernet-tree	树形以太网
EA	Electro absorption	电吸收(调制器)
EDFA	Erbium-doped fiber amplifier	掺铒光纤放大器
EDFFA	Erbium-doped fluoride fiber amplifier	掺铒氟光纤放大器
EIR	Excess information rate	过量信息速率
EMB	Effective modal bandwidth	有效模式带宽
EMS	Element management system	网元管理系统
EPON	Ethernet passive optical network	以太无源光网络
ER	Extended range	延伸范围、延伸距离
ERP	Ethernet ring protection	以太环网保护
ESCON	Enterprise serial connection	企业串行连接
EXP	Experimental	实验的
FAS	Frame alignment signal	帧同步信号

FC	Fibre Channel	光纤信道
FCC	Federal Communications Commission	(美国)联邦通信委员会
FCS	Frame check sequence	帧校验序列
FDDI	Fiber distributed data interface	光纤分布数据接口
FDI	Forward defect indicator	前向故障标识
FDM	Frequency division multiplexing	频分复用
FEC	Forward error correction	前向纠错(码)
FET	Field effect transistor	场效应晶体管
FIFO	First in first out	先进先出
FOM	Figure of merit	品质因数
FP	Fabry-Perot	法布里-珀罗(谐振腔)
FSAN	Full service access network	全业务接入网
FSR	Free spectral range	自由谱区
FTFL	Fault type and fault location	故障类型和故障定位
FTP	File transfer protocol	文件传输协议
FTTC	Fiber to the curb	光纤到路边
FWHM	Full-width half maximum	半幅全宽
FWM	Four-wave mixing	四波混频
GCC	General communications channel	通用通信信道
GCSR	Grating-coupled sampled reflector	光栅耦合取样反射器
GDMO	Guidelines for definition of managed objects	管理目标定义指南
GEM	GPON encapsulation method	GPON 封装方法
GEPON	Gigabit ethernet passive optical network	千兆比特以太无源光网络
GFC	Generic flow control	一般流量控制
GFP	Generic framing procedure	通用成帧规程
GFP-F	Frame mapped generic framing procedure	成帧映射通用成帧规程
GFP-T	Transparent mapped generic framing procedure	透明映射通用成帧规程
GMPLS	Generalized multiprotocol label switching	通用多协议标记交换
GPON	Gigabit PON	千兆比特 PON
GVD	Group velocity dispersion	群速度色散
HDLC	High-level data link control	高级别数据链路控制
HEC	Header error check	信头差错检验
HEC	Header error control	信头差错控制
HFC	Hybrid fiber coax	光纤同轴混合网
HIPPI	High performance parallel interface	高性能并行接口
HO-VCAT	High order-virtual concatenation	高阶虚拟级联
HOL	Head of line	线端
HTTP	Hypertext transfer protocol	超文本传输协议
I-Tag	Service identifier tag	业务识别标签
IAE	Incoming alignment error	输入定位故障
IBM	International Business Machines	国际商用机器公司
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	(美国)电气与电子工程师协会
IETF	Internet Engineering Task Force	互联网工程任务组
ILP	Integer linear program	整数线性规划

IP	Internet Protocol	互联网协议
IR	Intermediate reach	中等间距
ISI	Intersymbol interference	码间干扰
IS-IS	Intermediate system-intermediate system	中间系统到中间系统
ISO	International Standards Organization	国际标准化组织
ISP	Internet service provider	互联网业务提供商
ITU	International Telecommunications Union	国际电信联盟
IXC	Interexchange carrier	长途交换运营商
JC	Justification Control	调整控制
JET	Just-enough-time	恰量时间协议
KEOPS	Keys to optical packet switching	光分组交换关键技术(试验平台)
LACP	Link aggregation control protocol	链路汇聚控制协议
LAG	Link aggregation group	线路汇聚组
LAN	Local-area network	局域网
LCAS	Link capacity adjustment scheme	线路容量调节方案
LDP	Label distribution protocol	标记分配协议
LEAF	Large effective area fiber	大有效面积光纤
LEC	Local exchange carrier	本地交换运营商
LED	Light emitting diode	发光二极管
LH	Long-haul	长距
LLN	Linear lightwave network	线性光网络
LMDS	Local multipoint distribution service	本地多点分配业务
LMP	Link management protocol	链路管理协议
LO-VCAT	Low order-virtual concatenation	低阶虚拟级联
LR	Long range	长距离
LR	Long reach	长间距
LRM	Long reach multimode	长间距多模传输
LSP	Label-switched path	标记交换路径
LSR	Label-switched router	标记交换路由器
LT	Line terminal	线路终端
LTD	Lightpath topology design	光路拓扑设计
LTE	Line terminating equipment	线路终端设备
MAC	Media access control	媒体访问控制
MAN	Metropolitan-area network	城域网
MEMS	Micro-electro-mechanical systems	微机电系统
MIB	Management information base	管理信息库
MILP	Mixed integer linear program	混合线性整数规划
MFAS	Multi-frame alignment signal	多帧定位信号
MLM	Multilongitudinal mode	多纵模(激光器)
MMDS	Multichannel multipoint distribution service	多信道多点分配业务
MMF	Multimode fiber	多模光纤
MP	Merge point	交汇点
MPLS	Multiprotocol label switching	多协议标记交换
MPLS-TP	Multiprotocol label switching-transport profile	多协议标记交换-输运方略

MS	Multiplex section	复用段
MSA	Multi-source agreements	多源协议
MSP	Multiservice platform	多业务平台
MSTP	Multiple spanning tree protocol	多生成树协议
MZI	Mach-Zehnder interferometer	马赫-曾德尔干涉仪
NA	Numerical aperture	数值孔径
NALM	Nonlinear amplifying loop mirror	非线性放大环镜
NEBS	Network equipment building system	网络设备制造系统
NJO	Negative justification opportunity	负码速调整机会
NLSE	Nonlinear Schrö dinger equation	非线性薛定谔方程
NNI	Network-to-network interface	网络-网络接口
NOLM	Nonlinear optical loop mirror	非线性光纤环镜
NP	Nonpolynomial	非多项式
NRZ	Non-return-to-zero	非归零码
NSIF	Network and Services Interoperability Forum	网络和业务互操作性论坛
NTSC	National Television Standards Committee	(美国)国家电视标准委员会
NZ-DSF	Nonzero-dispersion-shifted fiber	非零色散位移光纤
OADM	Optical add/drop multiplexer	光分插复用器
OBLSR	Optical bidirectional line-switched ring	光双向线性交换环
OBPSR	Optical bidirectional path-switched ring	光双向路径交换环
OCDMA	Optical code division multiple access	光码分多址
OCh	Optical channel	光信道
OC-x	Optical carrier-x ($x=1,3,12,48,192,768,\cdots$)	光载波-x($x=1,3,12,48,192,168,\cdots$)
O/E/O	Optical-to-electrical-to-optical	光-电-光
ODU	Optical channel data unit	光信道数据单元
OFC	Optical Fiber Communications Conference	光纤通信会议
OFL	Overfilled Launch	过满注入
OIF	Optical Internetworking Forum	光互联网论坛
OLT	Optical line terminal	光线路终端
OMS	Optical multiplex section	光复用段
ONU	Optical network unit	光网络单元
OOK	On-off keying	开-关键控
OPU	Optical channel payload unit	光信道净荷单元
OSC	Optical supervisory channel	光监控信道
QSFP	Quad small form factor pluggable	4 通道小型可插拔接口
OSI	Open systems interconnection	开放的系统互连
OSPF	Open shortest path first	开放的最短路径优先
OTDM	Optical time division multiplexing	光时分复用
OTN	Optical transport network	光传送网
OTS	Optical transmission system	光传输系统
OTU	Optical channel transport unit	光信道传送单元
OUPSR	Optical unidirectional path-switched ring	光单向路径交换环
OXC	Optical crossconnect	光交叉互连
PBB	Provider backbone bridges	运营商骨干桥接(技术)

PBB-TE	Provider backbone bridges-traffic engineering	运营商骨干桥接-流量工程
PBT	Provider backbone transport	运用商骨干网传送(技术)
PC	Personal computer	个人计算机
PCC	Protection communication channel	保护通信信道
PCF	Photonic crystal fiber	光子晶体光纤
PCS	Physical coded sublayer	物理编码子层
PDH	Plesiochronous digital hierarchy	准同步数字体系
PDL	Polarization-dependent loss	偏振相关损耗
PHY	Physical layer	物理层
PJO	Positive justification opportunity	正码速调整机会
PLI	Payload length identifier	净荷长度标识
PLL	Phase-locked loop	锁相环
PLR	Point of local repair	本地修复节点
PM	Path monitoring	路径监测
PMA	Physical media attachment	物理介质附属子层
PMD	Polarization-mode dispersion	偏振模色散
PMMA	Polymethyl methacrylate	聚甲基丙烯酸甲酯
PNNI	Private network-to-network interface	专网到网络接口
PON	Passive optical network	无源光网络
PPP	Point-to-point protocol	点到点协议
PPS	Photonic packet switching	光分组交换
PRE	Preamble	前导码
PSI	Payload structure identifier	净荷结构识别
PSK	Phase-shift keying	相移键控
PSTN	Public switched telephone network	公共交换电话网
PT	Payload type	净荷类型
PTQ	Primary transit queue	主转发队列
PWDM	Point-to-point WDM	点到点 WDM
QAM	Quadrature amplitude modulation	正交振幅调制
QOS	Quality of service	服务质量
R-APS	Ring automatic protection switching	环形自动保护交换
RBOC	Regional Bell operating company	地区贝尔运营公司
RES	Reserved	被预约保留的(资源)
RIN	Relative intensity noise	相对强度噪声
RF	Radio frequency	射频
RPL	Ring protection link	环形保护链路
RPR	Resilient packet ring	弹性分组环
RN	Remote node	远程节点
ROADM	Reconfigurable optical add drop multiplexer	可重构光分插复用器
RS	Reduced slope	约化斜率
RSTP	Rapid spanning tree protocol	快速生成树协议
RSVP	Resource reservation protocol	资源预留协议
RSVP-TE	Resource reservation protocol-traffic engineering	资源预留协议-流量工程
RWA	Routing and wavelength assignment	路由与波长分配

RZ	Return-to-zero	归零码
S/PDIF	Sony/Philips Digital Interconnect Format	索尼/飞利浦数字互连格式
SA	Source address	源地址
SAN	Storage-area network	存储区域网络
SBCON	Single byte command code sets connection architecture	单字节指令码集连接结构
SBS	Stimulated Brillouin scattering	受激布里渊散射
SCM	Subcarrier multiplexing	副载波复用
SDH	Synchronous digital hierarchy	同步数字体系
SDM	Space division multliplexing	空分复用
SFD	Start-of-frame delimiter	帧起始分隔符
SLM	Single longitudinal mode	单纵模
SM	Section monitoring	段监测
SMF	Single-mode fiber	单模光纤
SMTP	Simple mail transfer protocol	简单邮件传送协议
SN	Sequence number	序列号
SNMP	Simple network management protocol	简单网络管理协议
SNR	Signal-to-noise ratio	信噪比
SOA	Semiconductor optical amplifier	半导体光放大器
SONET	Synchronous optical network	同步光网络
SOP	State of polarization	偏振态
SPE	Synchronous payload envelope	同步净荷包
SPM	Self-phase modulation	自相位调制
SPRing	Shared protection ring	共享保护环
SR	Short range	短距离
SR	Short reach	短间距
SRLG	Shared risk link group	共享风险链路群
SRS	Stimulated Raman scattering	受激拉曼散射
SSB	Single sideband	单边带
SSG	Super-structure grating	超结构型光栅
SSH	Secure shell	安全接壳
STAT	Status	状态
STM-x	Synchronous transport module-x (x = 1,4,16,64,256,…)	同步传送模块-x (x = 1,4,16,64,256,…)
STP	Spanning tree protocol	生成树协议
STQ	Secondary transit queue	二次传送序列
STS-x	Synchronous transport signal-x (x = 1,3,12,48,192,…	同步传送信号等级-x (x = 1,3,12,48,192,…)
SWP	Spatial walk-off polarizer	空间分离偏振器
T-MPLS	Transport multiprotocol label switching	传送多协议标记交换
TCM	Tandem connection monitoring	串联监控
TCM ACT	Tandem connection monitoring activation	串联监控激活
TCP	Transmission control protocol	传输控制协议
TDM	Time division multiplexing	时分复用
TE	Transverse electric	横电(模)
TFMF	Thin-film multicavity filter	薄膜多腔滤波器

TL-1	Transaction Language-1	事务处理语言-1
TLV	Type-length-value	类型-长度-值
TM	Transverse magnetic	横磁(模)
TMN	Telecommunications management network	电信管理网
TOAD	Terahertz optical asymmetric demultiplexer	太赫兹光非对称解复用器
TOSLINK®	Toshiba-link	东芝连接
TPON	PON for telephony	电话无源光网络
TTI	Trail trace identifier	路径踪迹标志
TTL	Time to live	存活时间
TWC	Tunable wavelength converter	可调谐波长变换器
UBR	Unspecified bit rate	未指定比特率
UDP	User datagram protocol	用户数据报协议
ULH	Ultra-long-haul	超长跨距
UNEQ	Unequipped	未装备的
UNI	User network interface	用户-网络接口
UPSR	Unidirectional path-switched ring	单向路径-交换环
UV	Ultraviolet	紫外线
VC	Virtual circuit	虚拟电路
VC	Virtual container	虚容器
VCG	Virtual concatenation group	虚拟级联组
VCAT	Virtual concatenation	虚拟级联
VCI	Virtual circuit identifier	虚电路识别符
VCO	Voltage control oscillator	压控振荡器
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser	垂直腔面发射激光器
VLAN	Virtual local area network	虚拟局域网
VLSI	Very large scale integrated circuits	超大规模集成电路
VOA	Variable optical attenuator	可调光衰减器
VP	Virtual path	虚通道
VPI	Virtual path identifier	虚通道标志符
VPN	Virtual private network	虚拟专用网
VSB	Vestigial sideband	残留边带
VSR	Very-short-reach	甚短距离
VT	Virtual tributary	虚支路
WA	Wavelength assignment	波长分配
WAN	Wide-area network	广域网
WDM	Wavelength division multiplexing	波分复用
WPON	Wavelength PON	波长无源光网络
WRPON	Wavelength-routed PON	波长路由无源光网络
WSS	Wavelength selective switch	波长选择开关

附录 B　符号与参数

表 B.1　在第 2 章中使用的参数与符号(除标明外,其余无量纲)

参　　数	符　　号	典型值/单位
有效面积	A_e	50 μm^2
脉冲包络	$A(z,t)$	
纤芯半径	a	4 μm(单模光纤)
比特率	B	Mb/s 或 Gb/s
电带宽	B_e	GHz
光带宽	B_o	GHz
误码率	BER	$10^9 \sim 10^{-15}$
归一化有效折射率	b	
电容	C	μF(微法)
真空中光速	c	3×10^8 m/s
色散参数	D	ps/nm · km
电通量密度	D	C/m^2
材料色散	D_M	ps/nm · km
偏振模色散	D_{PMD}	ps/$\sqrt{\text{km}}$
波导色散	D_W	ps/nm · km
色散位移光纤	DSF	$D=0$(1.55 μm)
电场	E	V/m
能级	E	能级差 ΔE, $\Delta E = hc/\lambda$(公式中用 nm 作为单位)
电子电荷	e	1.6×10^{-19} C
放大器噪声指数	F	dB
细度	F	
光载波频率	f_c	THz
泵浦频率	f_p	THz
信号频率	f_s	THz
放大器增益	G	
放大器不饱和增益	G_{max}	
布里渊增益系数	g_B	4×10^{-11} m/W
拉曼增益系数	g_R	6×10^{-14} m/W
磁场	H	A/m
布拉格常数	h	6.63×10^{-34} J/Hz
光电流	I_p	μA 或 nA
热噪声电流	I_{th}	3 pA/$\sqrt{\text{Hz}}$
玻尔兹曼常数	k_B	1.38×10^{-23} J/°K
色散长度	L_D	km
有效长度	L_e	km

续表

参　　数	符　　号	典型值/单位
链路长度	L	km
非线性长度	L_{NL}	km
耦合长度	l	μm
放大器间距	l	km
每 1 比特平均光子数	M	
非零色散位移光纤	*NZ-DSF*	$-6 \leq D \leq 6$ ps/nm · km(1.55 μm)
等效折射率	n_{eff}	
折射率	n	
自发辐射因子	n_{sp}	
纤芯折射率	n_1	
包层折射率	n_2	
非线性折射率系数	$\bar{n}$	$2.2 \sim 3.4 \times 10^{-8}$ μm^2/W
放大器输出饱和功率	P_{out}^{sat}	mW
放大器饱和功率	P^{sat}	mW
电极化	P	C/m^2
线性极化	P_L	C/m^2
本振功率	P_{LO}	dBm
非线性极化	P_{NL}	C/m^2
功率	P	W 或 mW
功率代价	*PP*	dB
功率代价(信号相关噪声)	$PP_{sig\text{-}dep}$	dB
功率代价(信号非相关噪声)	$PP_{sig\text{-}indep}$	dB
接收机灵敏度	$\bar{P}_{sens}$	dBm
负载电阻	R_L	Ω 或 kΩ
光电探测器响应度	R	A/W
反射率	R	
x 的实部	$\Re[x]$	
消光比	r	
标准单模光纤	*SMF*	$D = 17$ ps/nm · km (1.55 μm) $D = 0$ (1.3 μm)
信噪比	*SNR*	dB 或无单位
比特周期	T	ns
判决阈值	T_d	
V – 数	V	
光频率	ν	Hz
波长数量	W	
吸收系数	α	1/cm
光纤衰减	α	0.22 dB/km,在 1.55 μm 波段
传播常数	β	1/μm
群速度	$1/\beta_1$	m/s
GVD 参数	β_2	s^2/m (或用 D)
耦合比	γ	0 ~ 1
非线性传播系数	γ	2.6/W · km

续表

参　数	符　号	典型值/单位
相对折射率差	Δ	
布里渊增益带宽	Δf_B	20～100 MHz,在1.55 μm 波段
信道间间距	$\Delta\lambda$	nm
真空介电常数	ϵ_0	8.854×10^{-12} F/m
检测器量子效率	η	1 对 pinFET 管
四波混频效率	η	
输入耦合效率	η_i	
输出耦合效率	η_o	
啁啾因子	κ	
耦合系数	κ	1/μm
光栅周期	Λ	μm
滤波器中心波长	λ_0	μm
波长	λ	μm 或 nm
真空磁导率	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$ H/m
散粒噪声功率	σ^2_{shot}	
热噪声功率	σ^2_{th}	
信号-自发噪声功率	$\sigma^2_{sig\text{-}spont}$	
自发噪声-自发噪声功率	$\sigma^2_{spont\text{-}spont}$	
相位	ϕ	rad
电极化率	χ	
三阶电极化率	$\chi^{(3)}$	$6\times10^{-15}\text{cm}^3/\text{erg}$
角频率	$\omega,\ \omega_0$	

附录C 标 准

C.1 国际电信联盟(ITU-T)

这些标准可以通过 www. itu. ch 网站订购。

C.1.1 光纤

G.652. 单模光纤光缆的特性。
G.653. 色散位移单模光纤光缆的特性。
G.655. 非零色散位移单模光纤光缆特性。

C.1.2 SDH(同步数字体系)

G.691. 具有光放大器的单路 STM-64、STM-256 和其他 SDH 系统的光接口。
G.707. 同步数字系列(SDH)的网络节点接口。
G.708. 用于同步数字体系(SDH)的子 STM-0 网络节点接口。
G.774. 适用于网络单元的同步数字系列(SDH)管理信息模型。存在几个附录。
G.780. 同步数字体系(SDH)网络和设备的术语词汇。
G.781. 同步层功能。
G.783. 同步数字系列(SDH)设备功能块的特性。
G.784. 同步数字系列(SDH)管理。
G.803. 基于同步数字系列(SDH)的传送网结构。
G.805. 传送网的通用功能结构。
G.831. 基于同步数字系列(SDH)的传送网管理能力。
G.841. 同步数字系列(SDH)网络保护结构的类型与特性。
G.842. 同步数字系列(SDH)网络保护结构的互通。
G.957. 与同步数字系列(SDH)有关的设备和系统的光接口。

C.1.3 光网络

G.692. 带光放大器的多信道系统的光接口。
G.709. 光学传输网络(OTN)接口。
G.798. 光传送网络系列设备功能块特性。
G.871. 光传送网(OTN)建议框架。
G.872. 光传输网络体系结构。
G.874. 光传送网元管理方面。
G.875. 光网络单元管理信息模型。

G.957. 关于同步数字体系设备和系统的光接口。
G.959. 光网络物理层接口。
G.983. 基于无源光网络(PON)的宽带光接入系统。
G.975. 海底系统的前向纠错。
G.975.1. 高比特率 DWDM 海底系统的前向纠错。
G.8080. 自动交换光网络(ASON)体系结构。
G.8081. 自动交换光网络(ASON)术语和定义。
G.vsr. 局内系统的光接口。

C.1.4 管理

M.3000. 电信管理网(TMN)建议综述。
M.3010. 电信管理网(TMN)的原则。
M.3100. 通用网络信息模型。
Q.822. Q3 接口的一级、二级和三级描述——性能管理。
X.744. 信息技术—开放系统互连—系统管理：软件管理功能。

C.2 卓讯(Telcordia)公司

这些标准可以通过 www.telcordia.com 网站订购。

C.2.1 物理和环境

FR-2063. 网络设备构建系统（NEBS)系列的要求（NEBSFR)。

C.2.2 SONET

GR-253. 同步光网络(SONET)传输系统：常见的通用标准。
GR-496. SONET 分插复用器(SONET ADM)通用标准。
GR-1230. SONET 双向线路交换环设备通用标准。
GR-1244. 同步网络的时钟：常见的通用标准。
GR-1250. SONET 文件传输的一般要求。
GR-1365. 终端用户的 SONET 专线业务接口的通用标准。
GR-1374. 供运营商用的 SONET 运营商间接口物理层通用标准。
GR-1377. SONET OC-192 传输系统通用标准。
GR-1400. SONET 双馈单向路径交换环(UPSR)设备的通用标准。
GR-2875. 数字接口系统的通用要求。
GR-2899. SONET 双波段(1310/1550 nm)波分复用系统通用标准。
GR-2900. SONET 非对称多功能标准。
GR-2950. SONET 数字交叉连接系统(DCS)的信息模型。
GR-2954. 基于 TMN 的体系结构的传输性能管理。
GR-2996. SONET 数字交叉连接系统通用标准。

GR-3000. SONET 网元管理系统(EMS)的一般要求。

GR-3001. SONET 网络管理系统(NMS)的一般要求。

C.2.3 光网络

GR-1209. 光缆分支组件的通用要求。

GR-1377. SONET OC-192 传输系统的通用标准。

GR-2918. 供城域网应用的带数字从站的 DWDM 网络传输系统:常见的通用标准。

GR-2979. 光分插复用器(OADM)和光终端复用器(OTMS)常见的一般要求。

GR-2998. 波分复用(WDM)网元管理系统(EMS)的一般要求。

GR-2999. 波分复用(WDM)网络管理系统(NMS)的一般要求。

GR-3009. 光交叉连接的通用要求。

C.3 美国国家标准学会(ANSI)

这些标准可以通过 www. ansi. org 网站订购。

C.3.1 SONET

T1.105. 电信—同步光纤网(SONET)—包括多路结构、速率和格式的基本描述。

T1.105.01. 电信—同步光纤网(SONET)—自动保护开关。

C.3.2 光纤信道

X3.289. 信息技术—光纤信道—结构通用要求(FC FG)。

X3.303. 光纤信道物理和信令接口-3(FC-PH-3)。

附录D 波动方程

电磁波的传播是由以下麦克斯韦方程组决定的：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{D.1}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{D.2}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{D.3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{D.4}$$

式中，ρ 是电荷密度，$\boldsymbol{J}$ 是电流密度。假设介质中无自由电荷，因此 $\rho=0$。对这样的介质有 $\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E}$，其中 σ 是介质的电导率。由于硅的导电性是极其低的($\sigma\approx 0$)，故假设 $\boldsymbol{J}=0$，这相当于假设该介质是无损的。

在任何介质中，有

$$\boldsymbol{D} = \epsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$$

式中，$\boldsymbol{P}$ 是介质的电极化率，还有

$$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 是介质的磁极化率。由于硅是非极化材料，故令 $\boldsymbol{M}=0$。

利用这些关系，可以消除麦克斯韦旋度方程(D.3)和(D.4)中的磁通量密度，并只用场矢量 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$ 和电极化矢量 $\boldsymbol{P}$ 表达。如，

$$\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu_0\epsilon_0\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} - \mu_0\frac{\partial^2 \boldsymbol{P}}{\partial t^2} \tag{D.5}$$

为了从这个方程解出 $\boldsymbol{E}$，用 $\boldsymbol{P}$ 表达 $\boldsymbol{E}$。如果忽略非线性效应，则还可以假设由式(D.8)给出的 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 之间的关系是线性关系，并进一步由假设介质是各向同性的，可以将$\chi(\boldsymbol{r}, t)$写为$\chi(t)$。

可以用傅里叶变换很方便地从式(D.5)得出 $\boldsymbol{E}$。$\boldsymbol{E}$ 的傅里叶变换 $\tilde{\boldsymbol{E}}$ 由下式定义：

$$\tilde{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{r},\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)\exp(i\omega t)\,\mathrm{d}t$$

同样可定义 $\tilde{\boldsymbol{P}}$ 和 $\tilde{\boldsymbol{H}}$。它遵从傅里叶变换的性质：

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{r},\omega)\exp(-i\omega t)\,\mathrm{d}\omega$$

通过解这个关于 t 的微分方程，得到 $\partial \boldsymbol{E}/\partial t$ 的傅里叶变换为 $-i\omega\tilde{\boldsymbol{E}}$。

用式(D.5)的傅里叶变换，得到

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\boldsymbol{E}} = \mu_0\epsilon_0\omega^2\tilde{\boldsymbol{E}} + \mu_0\omega^2\tilde{\boldsymbol{P}}$$

利用下式：

$$\tilde{\boldsymbol{P}}(\boldsymbol{r},\omega)=\epsilon_0\tilde{\chi}(\boldsymbol{r},\omega)\tilde{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{r},\omega)$$

用 $\tilde{\boldsymbol{E}}$ 替换 $\tilde{\boldsymbol{P}}$，方程可以变为

$$\nabla\times\nabla\times\tilde{\boldsymbol{E}}=\mu_0\epsilon_0\omega^2\tilde{\boldsymbol{E}}+\mu_0\epsilon_0\omega^2\tilde{\chi}\tilde{\boldsymbol{E}}$$

将 $c=1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 代入上式，其中 c 是真空中光速。当忽略损耗时，$\tilde{\chi}$ 是一个实数，可以写出 $n(\omega)=\sqrt{1+\tilde{\chi}(\omega)}$，其中 n 是折射率。注意，这与用来定义折射率的

$$n^2(\omega)=1+\tilde{\chi}(\omega)$$

公式是一样的。这样，有

$$\nabla\times\nabla\times\tilde{\boldsymbol{E}}=\frac{\omega^2n^2(\omega)}{c^2}\tilde{\boldsymbol{E}} \tag{D.6}$$

利用这个等式

$$\nabla\times\nabla\times\tilde{\boldsymbol{E}}=\nabla(\nabla\cdot\tilde{\boldsymbol{E}})-\nabla^2\tilde{\boldsymbol{E}}$$

则式(D.6)能够重写为

$$\nabla^2\tilde{\boldsymbol{E}}+\frac{\omega^2n^2(\omega)}{c^2}\tilde{\boldsymbol{E}}=\nabla(\nabla\cdot\tilde{\boldsymbol{E}}) \tag{D.7}$$

因为假设介质是各向同性的(χ 不随 $\boldsymbol{r}$ 变化)，以及利用式(D.1)和式(D.6)，故可得到

$$0=\nabla\cdot\tilde{\boldsymbol{D}}=\epsilon_0\nabla\cdot(1+\tilde{\chi})\tilde{\boldsymbol{E}}=\epsilon_0n^2(\omega)\nabla\cdot\tilde{\boldsymbol{E}} \tag{D.8}$$

这就使我们能够简化式(D.8)，并得到 $\tilde{\boldsymbol{E}}$ 的波动方程：

$$\nabla^2\tilde{\boldsymbol{E}}+\frac{\omega^2n^2(\omega)}{c^2}\tilde{\boldsymbol{E}}=0$$

采用类似的步骤，可以推导出 $\tilde{\boldsymbol{H}}$ 的波动方程：

$$\nabla^2\tilde{\boldsymbol{H}}+\frac{\omega^2n^2(\omega)}{c^2}\tilde{\boldsymbol{H}}=0$$

附录 E　光纤中脉冲信号的传输

在数学方面，色散的产生是由于 β 与角频率 ω 不成正比，即 $\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}\omega \neq$ 常数（与 ω 有关）。用 β_1 表示 $\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}\omega$，而 β_1^{-1} 被称为群速度。正如将看到的，这就是脉冲在光纤中传输的速度（在不存在色散的情况下）。色散也称为群速度色散。

如果将一角频率为 ω_0 的纯单色波发送进一段光纤，则该光波的电场矢量（实数）大小为

$$|\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)| = \boldsymbol{J}(x,y)\cos(\omega_0 t - \beta(\omega_0)z) \tag{E.1}$$

式中，z 坐标沿着光纤轴方向，$\boldsymbol{J}(x,y)$ 为电场在光纤横截面上的分布，该分布由求解波动方程确定。该方程推导如下。

基模的纵向分量 $E_z = 2\pi J_1(x,y)\exp(i\beta z)$。由于光纤的圆柱对称性，这里的 $\boldsymbol{J}_1(x,y)$ 只是 $\rho = \sqrt{x^2+y^2}$ 的函数，并可用贝塞尔函数表达。基模的横向分量 $E_x(E_y) = 2\pi J_t(x,y)\exp(i\beta z)$，同样 $J_t(x,y)$ 只依赖于 $\sqrt{x^2+y^2}$，并且能够用贝塞尔函数表达。因此，能够写出相应于基模的每一个解为

$$\tilde{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{r},\omega) = 2\pi \boldsymbol{J}(x,y)\mathrm{e}^{i\beta(\omega)z}\hat{\boldsymbol{e}}(x,y) \tag{E.2}$$

式中，$J(x,y) = \sqrt{J_1(x,y)^2 + J_t(x,y)^2}$，$\hat{\boldsymbol{e}}$ 是 $\tilde{\boldsymbol{E}}(\boldsymbol{r},\omega)$ 方向的单位矢量。在这一方程中，已经清楚地写出 β 是 ω 的函数，用以强调这一依赖关系。通常，$\boldsymbol{J}()$ 和 $\hat{\boldsymbol{e}}()$ 也是 ω 的函数，但是对于频谱宽度比中心频率小很多的脉冲，这一依赖关系可以忽略。用于光纤通信系统中的脉冲满足这一条件。现在，式(E.1)可由式(E.2)的傅里叶逆变换得到。

这种纯单色波以速度 $\omega_0/\beta(\omega_0)$ 进行传播。这一速度被称为波的相速度(phase velocity of wave)。实际上，用于光纤通信的信号不是单色波，而是具有非零谱宽的脉冲信号。为了理解这样的脉冲如何传播，考虑一个仅有两个谱分量的脉冲，一个谱分量是 $\omega_0+\Delta\omega$，另一个是 $\omega_0-\Delta\omega$。进一步假定 $\Delta\omega$ 很小，以至于可以近似得到

$$\beta(\omega_0 \pm \Delta\omega) \approx \beta_0 \pm \beta_1 \Delta\omega$$

式中，$\beta_0 = \beta(\omega_0)$ 和

$$\beta_1 = \left.\frac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}\omega}\right|_{\omega=\omega_0}$$

这样一个脉冲的电场矢量大小为

$$\begin{aligned}|\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)| &= \boldsymbol{J}(x,y)\,[\cos((\omega_0+\Delta\omega)t - \beta(\omega_0+\Delta\omega)z) + \\ &\qquad \cos((\omega_0-\Delta\omega)t - \beta(\omega_0-\Delta\omega)z)] \\ &\approx 2\boldsymbol{J}(x,y)\cos(\Delta\omega t - \beta_1\Delta\omega z)\cos(\omega_0 t - \beta_0 z)\end{aligned}$$

这一脉冲可以看成在时间 t 和空间 z 上的两个因子的乘积：一个是变化很快的正弦因子，即 $\cos(\omega_0 t - \beta_0 z)$，它也被称为脉冲的相位；另一个是变化慢得多的包络，即 $\cos(\Delta\omega t - \beta_1\Delta\omega z)$。注意，在这种情况下，脉冲的相位以速度 ω_0/β_0 传播，而脉冲的包络以速度 $1/\beta_1$ 传播。ω_0/β_0 称为脉冲的相速度，$1/\beta_1$ 称为脉冲的群速度。

光通信中使用的脉冲能够按这样的方式表示为慢变化的(t 和 z 的)包络函数，它通常不是正弦形式，而与一个形式为 $\cos(\omega_0 t-\beta_0 z)$ 的正弦函数的乘积，其中 ω_0 为脉冲的中心频率。正如前述情况那样，脉冲的包络以群速度 $1/\beta_1$ 传播。这一概念能够更精确地叙述如下。

考虑这样一个脉冲，它的形状或者是包络，用 $A(z,t)$ 表示，它的中心频率是 ω_0 。假定脉冲的谱宽很窄。这就意味着大部分脉冲能量集中在一个频带内，其频宽与脉冲中心频率 ω_0 相比可以忽略。这一假定通常对于光通信系统中使用的大多数脉冲是满足的。利用该假定，能够证明这样脉冲的(实)电场矢量的大小是

$$|\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)| = \boldsymbol{J}(x,y)\Re[A(z,t)\mathrm{e}^{-i(\omega_0 t-\beta_0 z)}] \tag{E.3}$$

式中，$\Re[q]$ 表示 q 的实部(例如，可见文献[Agr97])。β_0 是传输常数 β 在频率 ω_0 处的值。$\boldsymbol{J}(x,y)$ 的意义与前面一样。为了数学上的方便，允许脉冲包络 $A(z,t)$ 具有复数取值，以使它不仅能反映传输期间脉冲形状的变化，而且还能反映任何引起的相位漂移。因此，如果 $A(z,t)=|A(z,t)|\exp(i\phi_A(z,t))$，则脉冲的相位是

$$\phi(t) = \omega_0 t - \beta_0 z - \phi_A(z,t) \tag{E.4}$$

为了描述实际脉冲，必须用 $\exp(-i(\omega_0 t-\beta_0 z))$ 乘以 $A(z,t)$，并取实部。我们将在式(E.6)中说明这一点。

这里，也已经假定对频率为 ω_0 的近单色光源进行调制而得到这一脉冲。这就意味着光源的频谱与脉冲频谱相比可以忽略。在本节后面，将考虑放松这一假设的影响。

假定 β 对 ω 的高阶微商可以忽略，就能导出脉冲形状演变的下述偏微分方程[Agr97]：

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = 0 \tag{E.5}$$

式中

$$\beta_2 = \left.\frac{\mathrm{d}^2\beta}{\mathrm{d}\omega^2}\right|_{\omega=\omega_0}$$

注意，如果 β 是 ω 的线性函数，即 $\beta_2=0$，则 $A(z,t)=F(t-\beta_1 z)$，其中 F 是一个满足式(E.5)的任意函数。因此，对于所有 z 和 t，$A(z,t)=A(0,t-\beta_1 z)$，并且任意脉冲在传输过程中的形状(和速度 $1/\beta_1$)都没有变化。换言之，如果群速度与 ω 无关，不会出现脉冲增宽。由此可见，β_2 是控制群速度或色散的关键参数。它称为群速度色散参数，简写成 GVD 参数。

E.1　啁啾高斯脉冲的传输

数学上，在 $z=0$ 处的一个啁啾高斯脉冲，用下述方程描述：

$$\begin{aligned} G(t) &= \Re\left[A_0 \mathrm{e}^{-\frac{1+i\kappa}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2} \mathrm{e}^{-i\omega_0 t}\right] \\ &= A_0 \mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2} \cos\left(\omega_0 t + \frac{\kappa}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right) \end{aligned} \tag{E.6}$$

该脉冲的峰值幅度是 A_0。参数 T_0 决定脉冲的宽度。它被解释为脉冲在 $1/e$ 强度点的宽度。(脉冲的强度是它的振幅的平方。)啁啾因子 κ 决定脉冲啁啾的程度。从式(E.4)可得该

脉冲的相位为

$$\phi(t)=\omega_0 t+\frac{\kappa t^2}{2T_0^2}$$

脉冲的瞬时角频率是相位的导数，由下式给出：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\omega_0 t+\frac{\kappa}{2}\frac{t^2}{T_0^2}\right)=\omega_0+\frac{\kappa}{T_0^2}t$$

定义高斯脉冲的啁啾因子为 T_0^2 乘以它的瞬时角频率的导数。因此，由式(E.6)描述的脉冲的啁啾因子是 κ 。这一脉冲被认为是线性啁啾，因为脉冲的瞬时角频率是随着时间 t 线性地增加或减少取决于啁啾因子 κ 的符号。换言之，对于线性啁啾脉冲，啁啾因子 κ 是一个常数，与时间 t 无关。

用 $A(z,t)$ 表示作为时间和距离的函数的一个啁啾高斯脉冲。在 $z=0$ 处，则有

$$A(0,t)=A_0\mathrm{e}^{-\frac{1+i\kappa}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2} \tag{E.7}$$

如果解方程式(E.5)，可以得到啁啾高斯脉冲[所以,这一微分方程的初条件是由式(E.7)给出 $A(0,t)$]，我们得到

$$A(z,t)=\frac{A_0T_0}{\sqrt{T_0^2-i\beta_2 z(1+i\kappa)}}\exp\left(-\frac{(1+i\kappa)(t-\beta_1 z)^2}{2\left(T_0^2-i\beta_2 z(1+i\kappa)\right)}\right) \tag{E.8}$$

该式可以重写成下述形式：

$$A(z,t)=\left[A_z\mathrm{e}^{-\frac{1+i\kappa}{2}\left(\frac{t-\beta_1 z}{T_z}\right)^2}\mathrm{e}^{i\phi_z}\right] \tag{E.9}$$

与式(E.6)比较，可以看到对于所有 $z>0$, $A(z,t)$ 也是一个啁啾高斯脉冲的包络，而且啁啾因子 κ 保持不变。然而，如果 $\beta_2\kappa>0$ ，该脉冲的宽度随着 z 的增加而增加。出现这一现象的原因是控制脉冲宽度的参数现在成为

$$\begin{aligned}T_z^2 &= \left(\Re\left[\frac{1+i\kappa}{T_0^2-i\beta_2 z(1+i\kappa)}\right]\right)^{-1}\\ &= T_0^2\left[\left(1+\frac{\beta_2 z\kappa}{T_0^2}\right)^2+\left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2\right]\end{aligned} \tag{E.10}$$

如果 $\beta_2\kappa>0$ ，上述参数随着 z 的增加而单调增加。在距离 z 处脉冲增宽的量度是比值 T_z/T_0 。

E.2 非线性效应对脉冲传输的影响

至今，已经理解了自相位调制(SPM)和交叉相位调制(CPM)的起源，以及这些效应引起脉冲相位变化的事实，这些变化是脉冲自身强度的函数(并且在 CPM 情况下，它可以是其他不同波长的脉冲强度的函数)。为了了解这一相位变化或者啁啾的大小及它如何与色散相互作用，需要回顾一下当脉冲在光纤中传输时控制脉冲形状演化的微分方程。这一关系对理解孤子的基本原理也是重要的。

考虑由式(E.3)给出的脉冲的(实)电场矢量的幅度，即

$$|\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)| = \boldsymbol{J}(x,y)\Re[A(z,t)\mathrm{e}^{-i(\omega_0 t-\beta_0 z)}]$$

前面已说明，$J(x,y)$ 是由光纤几何形状决定的基模电场的横向分布，$A(z,t)$ 是脉冲的复包络，ω_0 是中心频率，$\Re[\cdot]$ 表示其宗量的实部。设 A_0表示脉冲的峰值振幅，$P_0 = A_0^2$ 是它的峰值功率。

当存在 SPM 时，折射率变得与强度有关。对于单色平面波，折射率由下式给出：

$$\hat{n}(E) = n + \bar{n}I$$

其中，场强 $I = \frac{1}{2}\epsilon_0 cnE^2$ W/μm²，非线性折射系数 $\bar{n} = \frac{2}{\epsilon_0 cn}\frac{3}{8n}\chi^{(3)}$，$\chi^{(3)}$是三阶非线性极化率。

对于在光纤中传输的包络为 A 的非单色脉冲，这一关系必须修正。现在与频率和与强度相关的折射率为

$$\hat{n}(\omega,E) = n(\omega) + \bar{n}|A|^2/A_e \tag{E.11}$$

式中，$n(\omega)$ 是线性折射率。由于存在色散，它与频率有关，但是与强度无关。A_e 是光纤的有效横截面积，其典型值为 50 μm²。传输常数表达式

$$\beta_0 = \frac{\omega_0}{c}\left(n + \frac{3}{8n}\chi^{(3)}E^2\right)$$

也必须进行类似的修正，现在与频率和与强度相关的传输常数成为

$$\hat{\beta}(\omega,E) = \beta(\omega) + \frac{\omega}{c}\frac{\bar{n}|A|^2}{A_e} \tag{E.12}$$

注意，在式(E.11)和式(E.12)中，如果使用数值 $\bar{n} = 3.2\times10^{-8}$ μm²/W，脉冲强度 $|A|^2$ 必须采用单位瓦特(W)来表示。假定下面就是这种情况，并用 $|A|^2$ 表示脉冲的功率(虽然严格地说它仅仅与功率成正比)。

为了方便起见，表示

$$\gamma = \frac{\omega}{c}\frac{\bar{n}}{A_e} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{\bar{n}}{A_e}$$

因此，$\hat{\beta} = \beta + \gamma|A|^2$。将此式与式(E.11)比较，可以看出 γ 与传输常数 β 的关系和非线性折射率系数 $\bar{n}$ 与折射率 n 的关系相同。因此，称 γ 为非线性传输系数。在波长 $\lambda = 1.55$ μm 处，并取 $A_e = 50$ μm²，$\gamma = 2.6(\mathrm{W\cdot km})^{-1}$。

考虑到传输常数与强度有关，式(E.5)必须修正为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma|A|^2 A \tag{E.13}$$

在这一方程中，项 $\frac{i}{2}\beta_2\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$ 体现了色散的影响，而 $i\gamma|A|^2 A$ 体现了与强度相关的相移。

既然这一方程也包含了色散的影响，则以此方程作为出发点就能够分析色散和 SPM 对脉冲传输的联合影响。这些影响在性质上与色散或 SPM 单独起作用时的影响是不同的。

为了理解色散和 SPM 的相对影响，进行下述变量变换是方便的：

$$\tau = \frac{t-\beta_1 z}{T_0}, \qquad \xi = \frac{z}{L_D} = \frac{z|\beta_2|}{T_0^2}, \qquad U = \frac{A}{\sqrt{P_0}} \tag{E.14}$$

采用这些新的变量，式(E.13)能够写成

$$i\frac{\partial U}{\partial \xi}-\frac{\mathrm{sgn}(\beta_2)}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2}+N^2|U|^2U=0 \tag{E.15}$$

其中

$$N^2=\gamma P_0L_\mathrm{D}=\frac{\gamma P_0}{|\beta_2|/T_0^2}$$

式(E.15)称为非线性薛定谔方程(NLSE)。

由式(E.14)引入的变量变换可以解释如下。由于脉冲以速度β_1[①]传输(不存在色散时)，$t-\beta_1 z$就是随脉冲运动的坐标系中的时间轴。变量τ是这一坐标系中的时间，但单位为T_0，是脉冲宽度的单位。变量ξ是以色散长度$L_\mathrm{D}=T_0^2/|\beta_2|$为单位量度的距离。量$P_0$代表脉冲的峰值功率，因此$U$是对峰值功率归一化的脉冲包络。

注意，量$1/\gamma P_0$也具有长度的量纲，称其为非线性长度，标记为L_NL。设$\gamma=2.6/(\mathrm{W}\cdot\mathrm{km})^{-1}$和$P_0=1$ mW，可得$L_\mathrm{NL}=384$ km。如果脉冲功率P_0增加到10 mW,非线性长度下降到38 km。在讨论非线性效应时，非线性长度用做距离z的一个方便的归一化量度，正如讨论色散效应时色散长度所起的作用一样。因此，对于传输距离$z\ll L_\mathrm{NL}$时的脉冲，SPM对脉冲的影响可以忽略。那么，能够将NLSE中引入的量N写成$N^2=L_\mathrm{D}/L_\mathrm{NL}$。它是色散长度和非线性长度的比值。当$N\ll 1$时，非线性长度比色散长度大得多，以至于与色散效应相比非线性效应可以忽略。这就是说，NLSE中的第三项(包含N的项)可以忽略。在这种情况下，NLSE退化到式(E.5)，即描述色散单独存在时脉冲的演化，其中仍然使用式(E.14)给出的变量变换。

NLSE用于讨论GVD和SPM的联合效应的出发点。对于任意的N值，NLSE必须数值求解。这些数值解是理解色散和非线性对脉冲联合影响的重要工具，在文献[Agr95]中对此进行了广泛的讨论。

对于高斯脉冲，能够用式(E.13)估算SPM引起的啁啾。为了做到这一点，忽略了色散项，考虑方程

$$\frac{\partial A}{\partial z}+\beta_1\frac{\partial A}{\partial t}=i\gamma|A|^2A \tag{E.16}$$

应用式(E.14)引入的变量τ和U代替t和A，并取$L_\mathrm{NL}=(\gamma P_0)^{-1}$，就可以导出

$$\frac{\partial U}{\partial z}=\frac{i}{L_\mathrm{NL}}|U|^2U \tag{E.17}$$

注意，没有用z到ξ的变量变换，因为忽略色散时L_D趋于无穷大。上一方程的解为

$$U(z,\tau)=U(0,\tau)\mathrm{e}^{iz|U(0,\tau)|^2/L_\mathrm{NL}} \tag{E.18}$$

因此，SPM引起了相位变化，但是没有改变脉冲包络。注意，初始脉冲包络$U(0,\tau)$是任意的，所以上式对所有脉冲形状都是对的。因此，由脉冲本身引起的SPM仅仅导致啁啾，不管脉冲形状如何；仅仅是色散引起了脉冲增宽。然而，SPM引入的啁啾改变了色散引起的脉冲增宽效应。

---

① 群速度应为$1/\beta_1$——译者注。

E.3　孤子脉冲传输

在反常色散区（标准单模光纤和大多数色散位移光纤在 1.55 μm 波段）区域中，GVD 参数 β_2 是负的。因此，$\mathrm{sgn}(\beta_2)=-1$，式（E.15）的 NLSE 方程能够写成

$$i\frac{\partial U}{\partial \xi}+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2}+N^2|U|^2U=0 \tag{E.19}$$

在这一反常色散区，当 N 是整数时，出现了一个有趣的现象。在这种情况下，修正的 NLSE 式（E.19）能够被解析求解，并且得出的脉冲包络的振幅与 ξ 无关（当 $N=1$ 时），或者是 ξ 的周期函数（当 $N\geqslant 2$ 时）。这就意味着这些脉冲在传输时脉宽没有变化，或者脉宽周期性变化。这一方程的解称为孤子，N 称为孤子的阶数。

能够验证相应于 $N=1$ 的式（E.19）的解为

$$U(\xi,\tau)=\mathrm{e}^{i\xi/2}\mathrm{sech}\tau \tag{E.20}$$

相应于这一包络的脉冲称为基孤子。基孤子脉冲和它的包络分别画在图 2.25（a）和（b）中。（为说明起见，脉冲的频率被大大减小了。）

注意，（在随脉冲运动的坐标系中）基孤子脉冲包络的幅度或者脉冲的形状，不随距离坐标 z 改变。然而在脉冲传输时，它会产生与 z 成线性关系的相位移。

回顾一下孤子的阶数 N，定义为

$$N^2=\gamma P_0 L_{\mathrm{D}}=\frac{\gamma P_0}{|\beta_2|/T_0^2}$$

由于在给定光纤和工作波长时 γ 和 β_2 是固定的，因此。对于固定的孤子阶数，脉冲的峰值功率 P_0 随着脉冲宽度 T_0 的减小而增加。因为当在很高比特率下运行时需要很窄的脉冲，这也意味着在孤子通信系统中大峰值功率是必要的。

也能够验证相应于 $N=2$ 的式（E.19）的解为

$$U(\xi,\tau)=4\mathrm{e}^{i\xi/2}\frac{\cosh 3\tau+3\cosh\tau\,\mathrm{e}^{i4\xi}}{\cosh 4\tau+4\cosh 2\tau+3\cos 4\xi} \tag{E.21}$$

归一化脉冲包络的幅值作为 ξ 和 τ 的函数如图 E.1所示。从该图中能够清楚地看到脉冲包络相对于 ξ 的周期性。在每一个周期中，脉冲包络首先由于 SPM 引起的正啁啾而经历压缩，然后再经历增宽，最后又恢复到原来的形状。

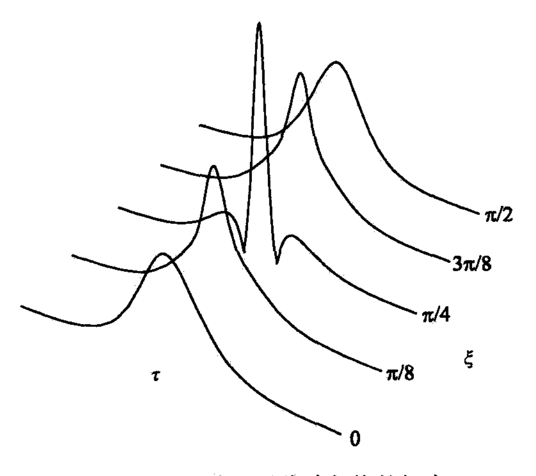


图 E.1　二阶孤子脉冲包络的幅度

进一步阅读材料

在文献[Agr95]中详细介绍了脉冲传输问题。对于希望深入钻研高斯和啁啾高斯脉冲传输数学问题的任一读者，由 Marcuse 写的经典文章[Mar80，Mar81]是必读的材料。

参考文献

[Agr95] G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics,* 2nd edition. Academic Press, San Diego, CA, 1995.

[Agr97] G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems.* John Wiley, New York, 1997.

[Mar80] D. Marcuse. Pulse distortion in single-mode fibers. *Applied Optics*, 19:1653–1660, 1980.

[Mar81] D. Marcuse. Pulse distortion in single-mode fibers. 3: Chirped pulses. *Applied Optics*, 20:3573–3579, 1981.

附录 F 非线性偏振

描述外加电场引入的偏振 $\boldsymbol{P}$ 和外加电场 $\boldsymbol{E}$ 之间关系的线性方程

$$\mathcal{P}(\boldsymbol{r},t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t} \chi(\boldsymbol{r},t-t')\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t')\,\mathrm{d}t'$$

只有在功率和/或比特率适中时成立。如果不是这样，这一方程必须推广为包含 $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}, t)$ 的较高次幂。对于各向同性介质及电场在单方向偏振以至于电场只有单个分量 $E(\boldsymbol{r}, t)$ 的情况下，上述关系能够被写成如下形式①：

$$\begin{aligned}\mathcal{P}(\boldsymbol{r},t) = {} & \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t} \chi^{(1)}(\boldsymbol{r},t-t_1)E(\boldsymbol{r},t_1)\,\mathrm{d}t_1 + \\ & \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t} \chi^{(2)}(t-t_1,t-t_2)E(\boldsymbol{r},t_1)E(\boldsymbol{r},t_2)\,\mathrm{d}t_1\,\mathrm{d}t_2 + \\ & \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t} \chi^{(3)}(t-t_1,t-t_2,t-t_3)E(\boldsymbol{r},t_1)E(\boldsymbol{r},t_2)E(\boldsymbol{r},t_3)\,\mathrm{d}t_1\,\mathrm{d}t_2\,\mathrm{d}t_3 + \\ & \cdots\end{aligned} \tag{F.1}$$

其中$\chi^{(1)}(\boldsymbol{r}, t)$ 称为线性磁化率，以区别于$\chi^{(i)}(\boldsymbol{r}, t)$，$i=2,3,\cdots$，后者称为高阶非线性磁化率。由于硅分子一定的对称特性，$\chi^{(2)}(\boldsymbol{r}, t)=0$ 。与$\chi^{(3)}(\,)$ 的效应相比，高阶磁化率$\chi^{(4)}(\,)$，$\chi^{(5)}(\,)$，$\cdots$ 的效应可以忽略。因此，能够将式(F.1)写成

$$\mathcal{P}(\boldsymbol{r},t) = \mathcal{P}_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{r},t) + \mathcal{P}_{\mathrm{NL}}(\boldsymbol{r},t)$$

式中，$\mathcal{P}_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{r}, t)$ 是由公式

$$\mathcal{P}_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{r},t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t} \chi^{(1)}(t-t')\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)\,\mathrm{d}t'$$

表示的线性偏振。非线性偏振 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{NL}}(\boldsymbol{r}, t)$ 由下式给出：

$$\mathcal{P}_{\mathrm{NL}}(\boldsymbol{r},t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t} \chi^{(3)}(t-t_1,t-t_2,t-t_3)\, E(\boldsymbol{r},t_1)E(\boldsymbol{r},t_2)E(\boldsymbol{r},t_3)\,\mathrm{d}t_1\,\mathrm{d}t_2\,\mathrm{d}t_3 \tag{F.2}$$

介质的非线性响应出现在一个很窄的、比 100 fs 还短的时间尺度上——比线性响应的时间尺度短得多——因此，可以假定对于宽度大于 1 ps 的脉冲非线性响应是瞬时出现的。注意，甚至当脉冲仅仅占据比特间隔的十分之一、比特率大于 100 Gb/s 时，这一假定也是满足的。在本书中，只考虑这种瞬时非线性响应的情况。当这一假定满足时，则有

$$\chi^{(3)}(t-t_1,t-t_2,t-t_3) = \chi^{(3)}\delta(t-t_1)\delta(t-t_2)\delta(t-t_3)$$

式中，在方程右边的$\chi^{(3)}$ 现在成为与 t 无关的一个常数。这一假定使得式(F.2)大大简化。现在可以导出

$$\mathcal{P}_{\mathrm{NL}}(\boldsymbol{r},t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(\boldsymbol{r},t)$$

---

① 此式中的$\chi^{(i)}$也应为 $\boldsymbol{r}$ 的函数，$\chi^{(2)}$和$\chi^{(3)}$中的宗量似乎漏掉了 $\boldsymbol{r}$。同样，式(F.2)中的$\chi^{(3)}$中也漏掉了 $\boldsymbol{r}$。本书在$\chi^{(3)}$中都加了宗量 ——译者注。

附录 G　多层介质薄膜滤波器

为了理解介质薄膜多腔滤波器(DTMF)的工作原理，需要先讨论电磁理论的一些结果。

G.1　电介质界面波的传播

平面电磁波的电场和磁场仅仅沿着传输方向的空间坐标变化。换句话说，在沿任何垂直于传播方向的平面内，电场和磁场都是常量。在任何这样的平面内，电场的振幅与磁场的振幅的比率被称为该平面处的阻抗。在仅支持一个传输波(即没有反射波)的介质中，该阻抗被称为介质的固有阻抗，用 η 表示。如果 ε 是介质的介电常数，μ 是它的磁导率，则 $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 。如果用 η_0 表示真空的固有阻抗，则对于折射率为 n 的非磁性电介质，它的固有阻抗为 $\eta = \eta_0/n$ 。(一个非磁性介质材料具有与真空同样的磁导率。由于最常用的介质是非磁性的，在下面的讨论中，所讨论的介质都是非磁性的。)

考虑如图 G.1(a)所示的折射率分别为 n_1 和 n_2 的两种介质之间的界面。假定一平面电磁波垂直入射到该界面上。在此界面处的反射系数是反射波电场的振幅与入射波电场振幅的比值。从电磁学原理[RWv93, Section 6.7]可以证明在此界面(对于垂直入射的)的反射系数为

$$\rho = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \tag{G.1}$$

因此，通过该界面传送的功率的分数为

$$1 - |\rho|^2 = 1 - \left|\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right|^2$$

在下面的讨论中，假定介质是无耗的，因而它们不吸收功率。

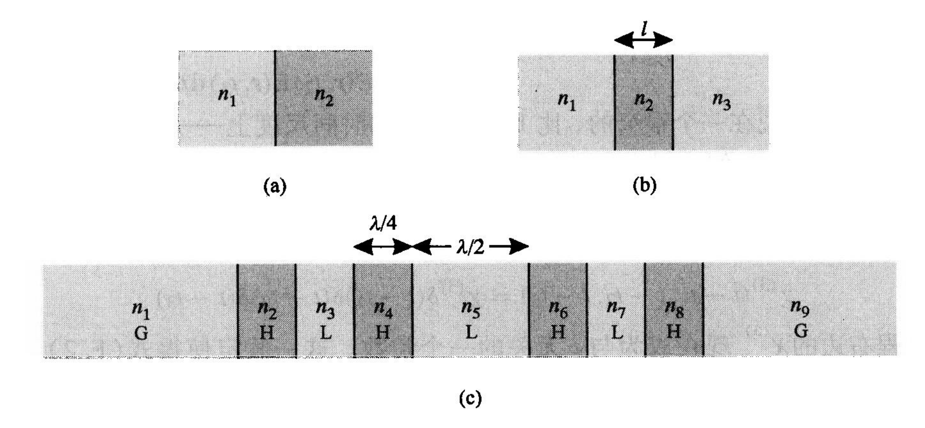


图 G.1　(a) 两个电介质的界面；(b) 在两个其他电介质之间的介质薄板或薄膜；(c) 多个介质薄板或薄膜堆叠在一起

现在考虑一块厚度为 l、折射率为 n_2 的介质材料薄板(介质 2)，它被放在折射率分别为 n_1 和 n_3 的两种介质(分别为介质 1 和介质 3)之间。假定介质 1 和介质 3 具有很长(实际上是无限大)的厚度。图 G.1(b)中示出了这一结构。从介质 1 注入的任一信号的一部分在界面 1-2 上被反射，另一部分被透射。被透射的部分信号又有一部分在界面 2-3 上被反射。这一反射信号中又有一部分在界面 2-1 上被反射，其余部分透射到介质 1 中并与第一个反射信号相加，如此等等。原则上，应用式(G.1)给出的反射系数公式可计算出的界面 1-2 上所有的反射信号，再将这些反射信号按其本身的相位进行相加就可以计算出界面 1-2 上的净反射信号。但是，整个过程可以用阻抗的概念进行简化，下面是有关它们的结果。

如果在电介质中的一些平面处的阻抗是 Z_L，称为负载阻抗，则在该平面前距离 l 处的阻抗，称为输入阻抗，作为波长的函数由下式给出：

$$Z_i = \eta \left(\frac{Z_L \cos(2\pi nl/\lambda) + i\eta \sin(2\pi nl/\lambda)}{\eta \cos(2\pi nl/\lambda) + iZ_L \sin(2\pi nl/\lambda)} \right) \tag{G.2}$$

式中，η 是介质的固有阻抗，n 是它的折射率。注意，在单一介质中 $Z_L = \eta$，并由式(G.2)同样给出 $Z_i = \eta$。这与先前叙述的在单一介质材料中所有平面处的阻抗都是 η 这一结论是一致的。

阻抗的概念是很有用的，因为反射系数和透射系数都可以用阻抗的概念表示。特别地，在具有固有阻抗 η 的介质中，具有负载阻抗 Z_L 界面上的反射系数为

$$\rho = \frac{Z_L - \eta}{Z_L + \eta} \tag{G.3}$$

在同一界面上的透射系数为

$$\tau = 1 - \rho = \frac{2Z_L}{Z_L + \eta} \tag{G.4}$$

注意式(G.1)是式(G.3)的特殊情况，设定 $\eta = \eta_1$ 和 $Z_L = \eta_2$，则由式(G.3)可得到式(G.1)。

现在再考虑将单个介质薄板放在两个其他介质之间的情况，如图 G.1(b)所示。界面 2-3 处的阻抗是 η_3。由此，界面 1-2 处的阻抗可以用式(G.2)计算得出

$$Z_{12} = \eta_2 \left(\frac{\eta_3 \cos(2\pi nl/\lambda) + i\eta_2 \sin(2\pi nl/\lambda)}{\eta_2 \cos(2\pi nl/\lambda) + i\eta_3 \sin(2\pi nl/\lambda)} \right)$$

用这一公式，可以由式(G.3)获得界面 1-2 上的反射系数：

$$\rho = \frac{Z_{12} - \eta_1}{Z_{12} + \eta_1}$$

如果把示于图 G.1(b)的、厚度为 l 的介质薄板看成一个滤波器，则它的功率传递函数，即透过介质薄板的部分功率由下式给出

$$T(\lambda) = 1 - |\rho|^2$$

设 $\lambda_0 = 2nl$，使在薄板中的光路径长度是半波长。注意，$T(\lambda_0) = 1$。在图 G.2 中画出了 $T(\lambda)$ 作为 λ_0/λ 的函数曲线，其中假定 $n_1 = n_3 = 1.5$ 和 $n_2 = 2.3$。

注意，在 $n_1 = n_3$ 的情况下，该滤波器变成法布里-珀罗滤波器(见习题 2.12)。

这一结果可以被推广到任意数量的电介质板，如下所述。考虑 k 个串接的电介质，它们的折射率分别为 n_1，n_2，…、n_k(不一定是不同的)，它们的厚度分别为 l_1，l_2，…，l_k，它们如图 G.1所示层叠在一起。同时假设 l_1 和 l_k 非常厚，本质上是无限厚。它能够被看成一个滤波

器，其中一种特殊情况是 DTMF。假定输入信号垂直注入到界面 1-2。如果求出界面1-2上的反射系数ρ，则能够用 $T(\lambda)=1-|\rho|^2$ 确定滤波器的功率传递函数 $T(\lambda)$ 。

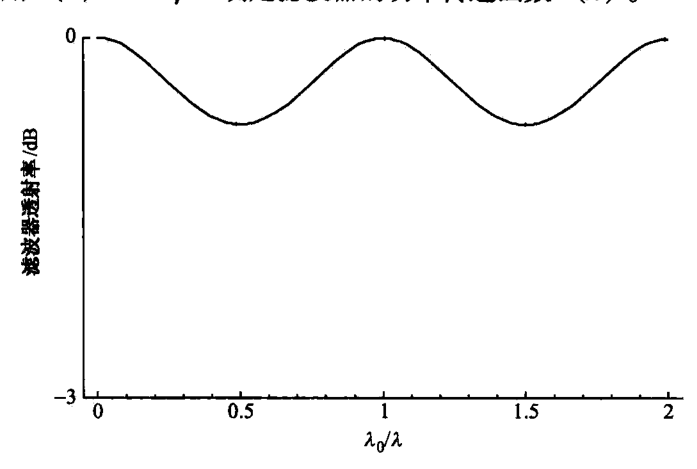


图 G.2 在 $n_1=n_3=1.52$ 和 $l=\lambda_0/2n_2$ 时，图 G.1(b)所示滤波器的传递函数

如果使用阻抗方法，则发现这是十分容易做到的。如果 η_i 是介质 i 的固有阻抗，$i=1,\cdots,k$，$\eta_i=\eta_0/n_i$ 。从滤波器的右端的界面 $(k-1)$-(k) 开始。该平面处的阻抗正好是介质 k 的固有阻抗，即 η_k 。在界面 $(k-2)$-$(k-1)$ 处的阻抗能够在 $Z_L=\eta_k$ ，$\eta=\eta_{k-1}$ ，$n=n_{k-1}$ 和 $l=l_{k-1}$ 条件下由式(G.2)计算出。继续用同样的方式，能够递归地计算界面 $(k-3)$-$(k-2)$，$\cdots$，1-2 处的输入阻抗。由此，用式(G.3)能够计算出界面1-2 处的反射系数，并且能够确定滤波器的功率传递函数。

G.2 滤波器的设计

尽管任何给定的多层介质的功率传递函数能够用前述步骤确定，设计这种形式的滤波器使其满足给定的滤波器的要求是实际中遇到的较为典型的问题。多个介质薄板结构，如图 G.1(c)所示的结构，应用相当广泛，许多著名的滤波器传递函数，如巴特沃思(Butterworth)滤波器和切比雪夫(Chebyshev)滤波器可以用这种结构综合得到[Kni76]。然而，这些滤波器的制作需要各种各样具有不同折射率的介质材料。这可能是实际中难以满足的要求。

然而，研究结果是只要使用两种不同折射率的介质材料，一种是折射率为 n_L 的低折射率材料，另一种是折射率为 n_H 的高折射率材料，就可以综合得到非常实用的滤波器传递函数[Kni76]。假定打算设计一个中心波长为λ_0的带通滤波器，那么实现这种滤波器的一般结构就是交替使用高折射率和低折射率介质层，层的厚度为等效于波长λ_0的四分之一或λ_0的二分之一。(折射率为 n_L 的四分之一波长介质薄板的厚度为$\lambda_0/4n_L$ 。)因为这些在光波长量级的厚度十分小，称之为“薄膜”比称之为“薄板”更适合。厚度为波长λ_0的二分之一的介质薄膜称为滤波器腔。一种特别有用的滤波器结构由一些厚度为四分之一波长薄膜分开的几个腔组成。如果用 H 和 L 分别表示的高折射率和低折射率介质的四分之一波长λ_0薄膜，那么能够用一系列 H 和 L 表示任一这样的滤波器。两个连续的 H 或两个连续的 L 表示半波长薄膜。例如，如果较浅色阴影部分的介质具有低折射率，而较深色阴影部分的介质具有高折射率，

则图 G.1(c)所示的由薄膜2~8组成的滤波器能够用序列 HLHLLHLH 表示。如果两边的玻璃介质1和9用G表示，图 G.1(c)的整个结构就能够表示为 GHLHLLHLHG。如果知道介质G、L和H的折射率分别为n_G、n_L和n_H，就能够使用总结出来的步骤计算滤波器的传递函数。对于$n_G = 1.52$，这是覆盖玻璃的典型数值;对于$n_L = 1.46$，这是低折射率介质SiO_2的折射率;对于$n_H = 2.3$，这是高折射率介质TiO_2的折射率，这样，滤波器的传递函数如图 G.3所示。从图 G.3 中可以看到，与中心波长相比，主瓣的宽度是相当宽的，旁瓣抑制比小于10 dB。显然，如果要使用这种滤波器，则需要更好的传递函数。

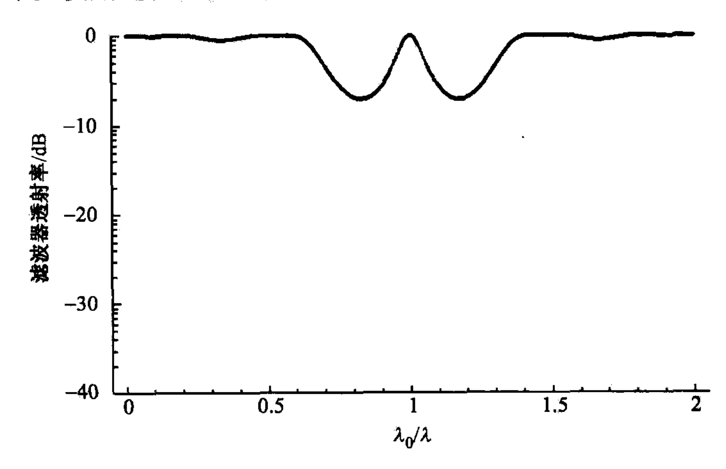


图 G.3　当$n_G = 1.52$、$n_L = 1.46$、$n_H = 2.3$时，图 G.1(c)所示滤波器的传递函数

使用多于3个四分之一波长薄膜能够得到更窄的通带和更大的旁瓣抑制比。例如，用

$$G\,(HL)^9HLL\,(HL)^9HG$$

序列结构的滤波器的传递函数如图 G.4 所示。符号$(HL)^k$表示序列 HL · HL · … · HL(k次重复)。注意，这种滤波器是单腔滤波器，因为它只用了一个半波长薄膜。然而它用了38个四分之一波长薄膜，腔的每一边各用了19个。

介质薄膜滤波器的传递函数在频域或者在λ_0/λ域是周期性的，就像法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器一样。在图 G.4(a)中显示了一个完整周期的滤波器传递函数。然而，在该图中看不出滤波器通带的结构。因而，在图 G.4(b)中表示了中心波长λ_0附近的一个窄频谱范围内的滤波器传递函数。现在可以清楚地看出滤波器通带结构。该图与法布里-珀罗滤波器的传递函数(见图2.17)相似并非偶然(见习题2.12)。

使用多腔可以使滤波器通带平坦，并且通带到禁带的边界是陡峭的。图2.19显示了这两种效果，其中画出了单腔、双腔和三腔介质薄膜滤波器在中心波长λ_0附近的传递函数。单腔滤波器和这里讨论的情况一样。双腔滤波器用序列如下:

$$G(HL)^6HLL\,(HL)^{12}HLL\,(HL)^6HG$$

三腔滤波器用序列如下:

$$G(HL)^5HLL\,(HL)^{11}HLL\,(HL)^{11}HLL\,(HL)^5HG$$

再一次使用下述数据：$n_G = 1.52$、$n_L = 1.46$、$n_H = 2.3$。

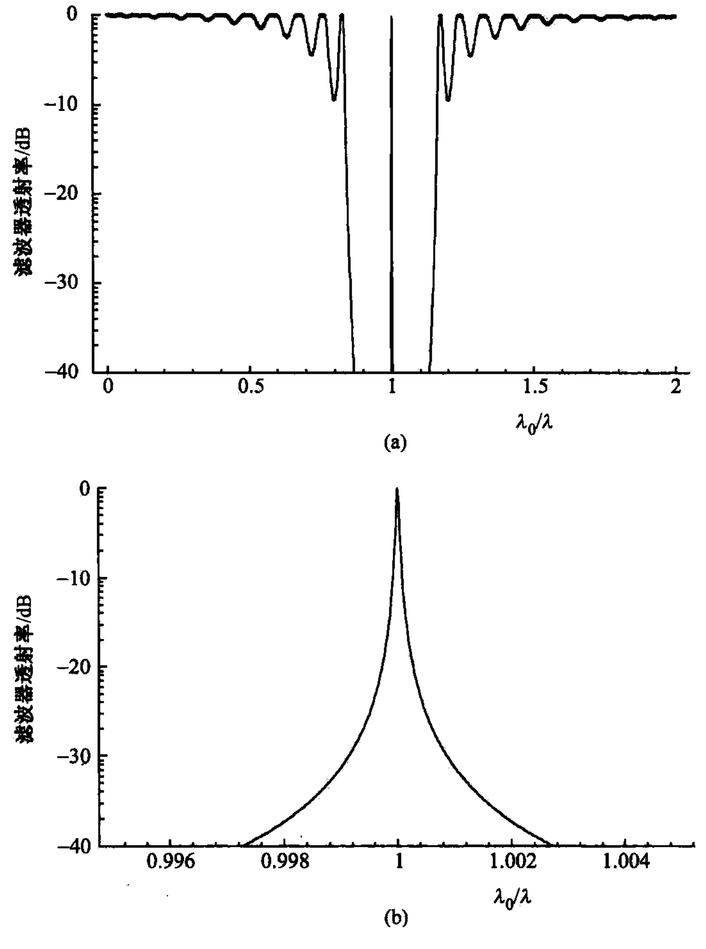


图 G.4 单腔介质薄膜滤波器的传递函数。薄膜序列结构为 $G(HL)^9HLL(HL)^9HG$, $n_G = 1.52$、$n_L = 1.46$、$n_H = 2.3$

参考文献

[Kni76] Z. Knittl. *Optics of Thin Films*. John Wiley, New York, 1976.

[RWv93] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. van Duzer. *Fields and Waves in Communication Electronics*. John Wiley, New York, 1993.

附录 H　随机变量与随机过程

本书多处都用到了随机变量和随机过程以描述噪声、偏振和网络流量。了解这些参数的统计性质对预测通信系统的性能是至关重要的。

H.1　随机变量

一个随机变量 X 的特征为概率分布函数：

$$F_X(x) = P\{X \leqslant x\}$$

$F_X(x)$ 的导数是概率密度函数：

$$f_X(x) = \frac{\mathrm{d}F_X(x)}{\mathrm{d}x}$$

注意

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)\mathrm{d}x = 1$$

在许多情况下，我们将有兴趣获得与这一概率函数相联系的数学期望，或者系综平均。函数 $g(X)$ 的数学期望定义为

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x)g(x)\mathrm{d}x$$

X 的均值定义为

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf_X(x)\mathrm{d}x$$

X 的均方值(二阶矩)为

$$E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_X(x)\mathrm{d}x$$

X 的方差定义为

$$\sigma_X^2 = E[X^2] - (E[X])^2$$

在许多情况下，还需要确定不是相互独立的两个或多个随机变量的统计特性。两个随机变量 X 和 Y 的联合概率分布函数定义为

$$F_{X,Y}(x, y) = P\{X \leqslant x, Y \leqslant y\}$$

有时，得到了某个随机变量中的一些信息，需要估计其余变量的分布函数。给定 Y 后，X 的条件概率分布函数为

$$F_{X|Y}(x|y) = P\{X \leqslant x|Y \leqslant y\}$$

贝叶斯(Bayes)定理给出了这些分布函数之间的重要关系

$$F_{X|Y}(x|y) = \frac{F_{X,Y}(x, y)}{F_Y(y)}$$

H.1.1 高斯分布

如果一个随机变量 X 的概率密度函数为

$$f_X(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{(x-\mu)^2/\sigma^2},\quad -\infty\leqslant x\leqslant\infty$$

则说这一随机变量遵从高斯分布。式中，μ 是 X 的均值，σ^2是 X 的方差。为了计算误码率，需要计算 $X\geqslant v$ 的概率，它定义为函数：

$$Q(v)=\int_v^{\infty}f_X(x)\mathrm{d}x$$

该函数能通过数值估算。例如，如果 $v=6$，则 $Q(v)=10^{-9}$，如果 $v=8$，则 $Q(v)=10^{-15}$。

同样，如果 X 和 Y 是联合分布的高斯随机变量，那么能够证明

$$E[X^2Y^2]=E[X^2]E[Y^2]+2(E[XY])^2 \tag{H.1}$$

H.1.2 麦克斯韦分布

麦克斯韦概率密度函数用来计算偏振模色散引起的代价。如果一个随机变量 X 的概率密度函数为

$$f_X(x)=\frac{\sqrt{2}}{\alpha^3\sqrt{\pi}}x^2e^{-x^2/2\alpha^2},\qquad x\geqslant 0$$

则说这一随机变量遵从麦克斯韦分布，式中 α 是与分布有关的参数。X 的均值和均方值能够计算如下

$$E[X]=2\alpha\sqrt{\frac{2}{\pi}}$$

和

$$E[X^2]=3\alpha^2=\frac{3}{8}\pi(E[X])^2$$

因而，方差为

$$\sigma_X^2=E[X^2]-(E[X])^2=\alpha^2\left(3-\frac{8}{\pi}\right)$$

可以表明

$$P(X>3E[X])\approx 4\times 10^{-5}$$

H.1.3 泊松分布

离散随机变量 X 在分立的、但可能无限多个值的集 $S=\{x_1,x_2,x_3,\cdots\}$ 中取值。该变量用概率质量函数 $P(x)$ 表征，它是 X 取 x 值的概率。一个函数 $g(X)$ 的数学期望定义为

$$E[g(X)]=\sum_{i|x_i\in S}g(x_i)P(x_i)$$

如果

$$P(i)=\frac{\mathrm{e}^{-r}r^{i}}{i!},\ i=0,1,2,\ldots$$

则 X 是泊松随机变量，式中 r 是与分布有关的参数。容易验证 $E[X]=r$，$\sigma_X^2=r$。

H.2 随机过程

随机过程用来模拟时变随机事件。一个随机过程 $X(t)$ 只是一个随机变量序列 $X(t_1)$，$X(t_2)$，…，每个随机变量对应一个瞬时时间。它的一阶概率分布函数为

$$F(x,t)=P\{X(t)\leqslant x\}$$

一阶概率密度函数为

$$f(x,t)=\frac{\partial F(x,t)}{\partial x}$$

二阶分布函数是联合分布函数

$$F(x_1,x_2,t_1,t_2)=P\{X(t_1)\leqslant x_1,X(t_2)\leqslant x_2\}$$

相应的二阶密度函数定义为

$$f(x_1,x_2,t_1,t_2)=\frac{\partial^2 F(x_1,x_2,t_1,t_2)}{\partial x_1\partial x_2}$$

随机过程的均值为

$$\mu(t)=E[X(t)]=\int_{-\infty}^{\infty}xf(x,t)\mathrm{d}x$$

该随机过程的自相关函数是

$$R_X(t_1,t_2)=E[X(t_1)X(t_2)]=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}x_1x_2f(x_1,x_2,t_1,t_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2$$

其自协方差函数定义为

$$L_X(t_1,t_2)=R_X(t_1,t_2)-E[X(t_1)]E[X(t_2)]$$

如果随机过程的均值是常数

$$E[X(t)]=\mu$$

并且它的自相关(和自协方差)仅与 $\tau=t_1-t_2$ 有关，即 $R_X(\tau)=E[X(t)X(t+\tau)]$ 和 $L_X(\tau)=R_X(\tau)-\mu^2$，则称其为广义平稳(或协方差平稳)过程。对于广义平稳随机过程，其功率谱密度是自协方差的傅里叶变换，即

$$S_X(f)=\int_{-\infty}^{\infty}L_X(\tau)\mathrm{e}^{-i2\pi f\tau}\mathrm{d}\tau$$

注意，随机过程的方差是

$$\sigma_X^2=L_X(0)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}S_X(f)\mathrm{d}f$$

在许多情况下，将系统中引入的噪声描述为平稳随机过程。在这种情况下，谱密度可用来表述噪声的频谱分布。例如，在接收机中，噪声 $X(t)$ 和信号通过一个具有冲击响应 $h(t)$

的低通滤波器。滤波器的传递函数 $H(f)$ 是它的冲击响应的傅里叶变换。在这种情况下，输出噪声过程 $Y(t)$ 的谱密度能够表示为

$$S_Y(f) = S_X(f)|H(f)|^2$$

假定该滤波器是一个具有带宽 B_e 的理想低通滤波器，即 $H(f) = 1, -B_e \leqslant f \leqslant B_e$，否则就为0。因此，在输出处噪声过程的方差可以简单地表示为

$$\sigma_Y^2 = L_Y(0) = \frac{1}{2\pi}\int_{-B_e}^{B_e} S_X(f)\mathrm{d}f$$

H.2.1 泊松随机过程

泊松随机过程被用来模拟光通信系统中光子到达的规律。它们也被广泛用于模拟通信网中流量到达的规律。该模型主要对电话呼叫是精确的，但是将其用于其他方面没有太多的理由。

泊松过程用速率参数λ表征。对于两个任意的瞬时时刻 t_1 和 $t_2 > t_1$，$X(t_2) - X(t_1)$ 是在时间间隔 $(t_1, t_2]$ 内到达的数量。在该期间内到达的数量遵从泊松分布，即

$$P\left(X(t_2) - X(t_1) = n\right) = \mathrm{e}^{-\lambda(t_2-t_1)}\frac{(\lambda(t_2-t_1))^n}{n!}$$

式中，n 是非负整数。因而，在这一期间到达数量的平均值是

$$E[X(t_2) - X(t_1)] = \lambda(t_2 - t_1)$$

泊松过程具有许多重要的特性，这使得它更容易分析具有泊松流量的系统，而不是具有其他流量的系统。文献[BG92]对该问题进行了很好的总结。

H.2.2 高斯随机过程

在许多情况下，把噪声当做广义平稳高斯随机过程 $X(t)$ 进行模拟。通常也假定任意两个瞬时 $t_1 \neq t_2$ 的随机变量 $X(t_1)$ 和 $X(t_2)$ 是均值为 μ 的独立高斯变量。对于这样一个过程，能够应用式(H.1)写出

$$E[X^2(t)X^2(t+\tau)] = (E[X^2(t)])^2 + 2(E[X(t)]E[X(t+\tau)])^2$$

即

$$E[X^2(t)X^2(t+\tau)] = R_X^2(0) + 2R_X^2(\tau)$$

进一步阅读材料

有几本很好的关于概率论和随机过程方面的书籍。例如，可以阅读文献[Pap91, Gal99]。

参考文献

[BG92] D. Bertsekas and R. G. Gallager. *Data Networks*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.

[Gal99] R. G. Gallager. *Discrete Stochastic Processes*. Kluwer, Boston, 1999.

[Pap91] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes,* 3rd edition. McGraw-Hill, New York, 1991.

附录 I　接收机噪声的统计理论

按照文献[BL90,RH90]的方法推导 PIN 接收机光电流的统计表达式作为讨论的起始点。按如下方式考虑光电检测过程是有益的。每次一个光子到达接收机，接收机就产生一个小的电流脉冲。设用 t_k 表示光子到达接收机的时间。那么，所产生的光电流能够表示为

$$I(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} eh(t-t_k) \tag{I.1}$$

式中，e 是电子电荷，$eh(t-t_k)$ 表示在时刻 t_k 到达的一个光子产生的电流脉冲。注意，既然 $eh(t-t_k)$ 是由单个电子产生的电流，就一定有

$$\int_{-\infty}^{\infty} eh(t-t_k)\mathrm{d}t=e$$

光子的到达可以用泊松过程描述，它的速率为 $P(t)/hf_c$。其中，$P(t)$ 是瞬时光功率，hf_c 是光子能量。因此，电子产生的速率也可以被考虑成是一个泊松过程，它的速率为

$$\lambda(t)=\frac{\mathcal{R}}{e}P(t)$$

式中，$\mathcal{R}=\eta e/hf_c$ 是光检测器的响应度，η 是量子效率。

为了估计式(I.1)，把时间轴分割成长度为 δt 的许多小的时间间隔，其中第 k 个间隔为 $[(k-1/2)\delta t,(k+1/2)\delta t]$。设 N_k 表示第 k 个间隔期间产生的电子数。用这些表示法，能够将式(I.1)重写为

$$I(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} eN_k h(t-k\delta t)$$

注意，既然间隔是不重叠的，N_k 就是独立泊松随机变量，其速率为 $\lambda(k\delta t)\delta t$。

首先，计算在已知的光功率 $P(\ )$ 下光电流的均值和自相关函数。光电流的均值是

$$E[I(t)|P(\,)]=\sum_{k=-\infty}^{\infty} eE[N_k]h(t-k\delta t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} e\lambda(k\delta t)\delta t\, h(t-k\delta t)$$

在 $\delta t\to 0$ 的极限情况下，上式可以重写成

$$E[I(t)|P(\,)]=\int_{-\infty}^{\infty} e\lambda(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau=\mathcal{R}\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

类似地，光电流的自相关函数能够写成

$$\begin{aligned}E[I(t_1)I(t_2)|P(\,)] &= \int_{-\infty}^{\infty} e^2\lambda(\tau)h(t_1-\tau)h(t_2-\tau)\mathrm{d}\tau+\\ &\quad E[I(t_1)|P(.)]E[I(t_2)|P(.)]\\ &= e\mathcal{R}\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau)h(t_1-\tau)h(t_2-\tau)\mathrm{d}\tau+\\ &\quad \mathcal{R}^2\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau)h(t_1-\tau)\mathrm{d}\tau\int_{-\infty}^{\infty} P(\tau)h(t_2-\tau)\mathrm{d}\tau\end{aligned}$$

对于每一个接收到的光子，一个理想的光电检测器产生纯电流脉冲。对于这样的检测器 $h(t) = \delta(t)$ ，其中 $\delta(t)$ 是冲击函数，其特性为 $\delta(t) = 0, t \neq 0$ ，以及 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)\mathrm{d}t = 1$ 。对于这种情况，均值光电流成为

$$E[I(t)|P(.)] = \mathcal{R}P(t)$$

它的自相关函数是

$$E[I(t_1)I(t_2)|P(.)] = e\mathcal{R}P(t_1)\delta(t_2 - t_1) + \mathcal{R}^2P(t_1)P(t_2)$$

去掉关于 $P(.)$ 的约束条件，上面两式为

$$E[I(t)] = \mathcal{R}E[P(t)] \tag{I.2}$$

和

$$E[I(t_1)I(t_2)] = e\mathcal{R}E[P(t_1)]\delta(t_2 - t_1) + \mathcal{R}^2E[P(t_1)P(t_2)]$$

由此给出 $I(t)$ 的自协方差函数为

$$\begin{aligned} L_{\mathrm{I}}(t_1, t_2) &= E[I(t_1)I(t_2)] - E[I(t_1)]E[I(t_2)] \\ &= e\mathcal{R}E[P(t_1)]\delta(t_2 - t_1) + \mathcal{R}^2L_{\mathrm{P}}(t_1, t_2) \end{aligned} \tag{I.3}$$

式中，L_{P} 表示 $P(t)$ 的自协方差函数。

I.1 散粒噪声

首先，考虑将恒定功率 P 注入到接收机的简单情况。对于这种情况，$E[P(t)] = P$ 及 $L_{\mathrm{P}}(\tau) = 0$ ，并且式(L.2)和式(L.3)能够写成

$$E[I(t)] = \mathcal{R}P$$

和

$$L_{\mathrm{I}}(\tau) = e\mathcal{R}P\delta(\tau)$$

式中，$\tau = t_2 - t_1$ 。光电流的功率谱密度是自协方差的傅里叶变换，它由下式给出：

$$S_{\mathrm{I}}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} L_{\mathrm{I}}(\tau)\mathrm{e}^{-i2\pi f\tau}\mathrm{d}\tau = e\mathcal{R}P$$

因此，散粒噪声电流能够被考虑为具有平坦谱密度的白噪声过程，正如本处情况一样。在接收机带宽 B_{e} 内的散粒噪声功率为

$$\sigma_{\mathrm{shot}}^2 = \int_{-B_{\mathrm{e}}}^{B_{\mathrm{e}}} S_{\mathrm{I}}(f)\mathrm{d}f = 2e\mathcal{R}PB_{\mathrm{e}}$$

因而，光电流能够被写成

$$I = \overline{I} + i_{\mathrm{s}}$$

式中，$\overline{I} = \mathcal{R}P$ ，而 i_{s} 是散粒噪声电流，其均值为零，方差为 $e\mathcal{R}PB_{\mathrm{e}}$。

I.2 放大器噪声

光放大器除提供增益之外也给信号引入自发辐射噪声。考虑带有光前置放大器的光通信系统。在接收机输入端的电场可以写成

$$E(t)=\sqrt{2P}\cos(2\pi f_c t+\Phi)+N(t)$$

式中，P 是信号功率，f_c 是载波频率，Φ 是均匀分布于$[0,2\pi]$中的一个随机相位。$N(t)$ 表示放大器自发辐射噪声。对于我们而言，假定它是具有自相关函数 $R_N(\tau)$ 的零均值高斯噪声过程。

接收机的接收功率为

$$P(t)=E^2(t)=2P\cos^2(2\pi f_c t+\Phi)+2\sqrt{2P}N(t)\cos(2\pi f_c t+\Phi)+N^2(t)$$

其平均功率为

$$E[P(t)]=P+R_N(0) \tag{I.4}$$

为了计算自协方差，注意，因为 $N(t)$ 是一个高斯过程，使用力矩计算公式(H.1)，则有

$$E[N^2(t)N^2(t+\tau)]=R_N^2(0)+2R_N^2(\tau)$$

应用这一事实，$P(.)$ 的自协方差能够计算得到

$$L_P(\tau)=2R_N^2(\tau)+4PR_N(\tau)\cos(2\pi f_c\tau)+\frac{P^2}{2}\cos(4\pi f_c\tau) \tag{I.5}$$

相应的谱密度由下式给出：

$$\begin{aligned}S_P(f)&=\int_{-\infty}^{\infty}L_P(\tau)e^{-i2\pi f\tau}d\tau\\&=2S_N(f)*S_N(f)+2P[S_N(f-f_c)+S_N(f+f_c)]+\\&\qquad\frac{P^2}{4}[\delta(f-2f_c)+\delta(f+2f_c)]\end{aligned} \tag{I.6}$$

式中，$*$ 表示卷积算子，即$f(x)*g(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f(u)g(x-u)du$。

式(I.5)和式(I.6)中的最后一项可以忽略，因为在光检测之后 $2f_c$ 分量将被滤除。

为了推导噪声功率，回到式(I.3)，并用式(I.4)和式(I.5)[①]分别代替式中的$E[P(.)]$和$L_P(.)$ 可以获得

$$L_I(\tau)=e\mathcal{R}[P+R_N(0)]\delta(\tau)+\mathcal{R}^2[4PR_N(\tau)\cos(2\pi f_c\tau)]+\mathcal{R}^2[2R_N^2(\tau)]$$

也可以得到

$$\begin{aligned}S_I(f)&=e\mathcal{R}[P+R_N(0)]+\mathcal{R}^2 2P[S_N(f-f_c)+S_N(f+f_c)]+\\&\qquad\mathcal{R}^2[2S_N(f)*S_N(f)]\end{aligned} \tag{I.7}$$

式中，右边第一项表示由于信号和放大器噪声引起的散粒噪声项。第二项表示信号-辐射差拍噪声，最后一项是自发辐射-自发辐射差拍噪声。请注意，到目前为止，假定放大器噪声是高斯型的，而且其谱形状 $S_N(f)$ 是任意的。实际上，合适的假定是放大器噪声以频率f_c 为中心，在光频带 $B_0<2f_c$ 内是白噪声，光谱形状为

$$S_N(f)=\begin{cases}\frac{P_n(G-1)}{2}, & |f-f_c|\leqslant B_0\text{ ②}\\0, & \text{其他}\end{cases}$$

① 原文为式(I.6)——译者注。

② $|f-f_c|$，原文为$|f\pm f_c|$——译者注。

式中，P_n 等于 $n_{sp}hf_c$，这里 n_{sp} 是自发辐射因子。相应地，有

$$R_N(0)=\int_{-\infty}^{\infty}S_N(f)\mathrm{d}f=P_n(G-1)B_o$$

从式(I.7)得到的光电流的频谱密度 $S_I(f)$ 如图 I.1 所示，其中假定 $S_N(f)$ 为前述的值。注意，如前所说，散粒噪声是白噪声，而信号-自发辐射差拍噪声谱具有矩形形状，自发辐射-自发辐射差拍噪声是三角形的。此外，入射光功率 P 由 GP_i 给出，其中 P_i 为放大器的输入功率。

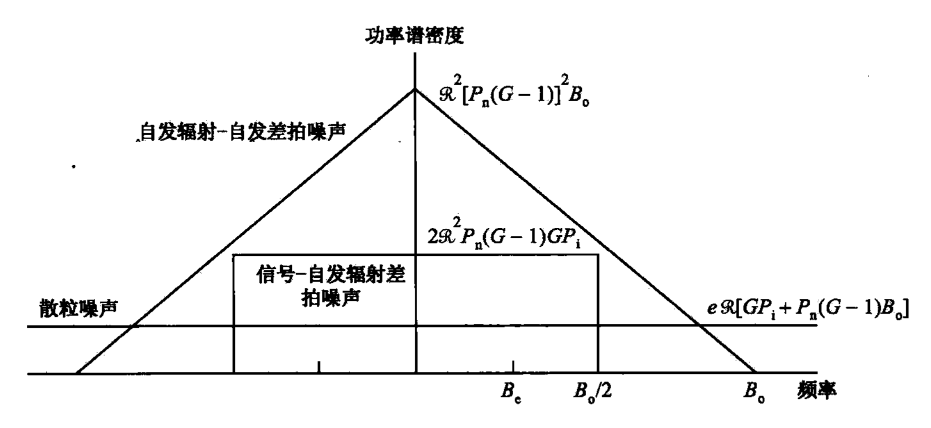


图 I.1 光电流的谱密度

注意，光电流通过一个带宽为 B_e 的低通滤波器。滤波器的输出端的噪声功率为

$$\sigma^2=\int_{-B_e}^{B_e}S_I(f)\mathrm{d}f=\sigma^2_{\text{shot}}+\sigma^2_{\text{sig-spont}}+\sigma^2_{\text{spont-spont}}$$

式中

$$\sigma^2_{\text{shot}}=2e\mathcal{R}[GP_i+P_n(G-1)B_o]B_e$$

$$\sigma^2_{\text{sig-spont}}=4\mathcal{R}^2GP_iP_n(G-1)B_e$$

和

$$\sigma^2_{\text{spont-spont}}=\mathcal{R}^2[P_n(G-1)]^2(2B_o-B_e)B_e$$

参考文献

[BL90] J. R. Barry and E. A. Lee. Performance of coherent optical receivers. *Proceedings of IEEE*, 78(8):1369–1394, Aug. 1990.

[RH90] R. Ramaswami and P. A. Humblet. Amplifier induced crosstalk in multi-channel optical networks. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 8(12):1882–1896, Dec. 1990.

附录 J　异步传输模式

异步传输模式(ATM)是一种网络标准，开发该标准的目的之一是将语音和数据网络结合在一起。在其开发之时，语音网络属于电信产业，而数据网络属于计算机产业和大众。当IP成为主导的数据网络时，ATM被用来提供IP流量面向连接的数据包传输。现在，在很大程度上，它已经被多协议标签交换(MPLS)取代，然而它还存在于许多已过时但暂时难以替代的系统中。它实现了现代分组交换的许多想法，其中一些将在本附录中描述。

ATM网使用固定大小的53字节的数据包或信元，这个信元长度是语音和数据应用相互冲突的要求之间的一种折中方案。较短的信元长度对语音较为合适，因为这时数据包发送的延迟必须很短。而较长的信元长度则对数据较为合适，因为在长数据包中开销相对较短。在ATM信元的53字节中，其中5字节构成信头，这是开销所需载负的信息，如数据包的目标地址。ATM网络涵盖了从局域网(LAN)到城域网(MAN)再到广域网(WAN)的整个范围。

ATM的关键优势之一是它能够提供保证质量的业务，如带宽和延迟，即使在使用数据包的统计复用时，也可使链路带宽得到有效利用(见第1章)。ATM通过利用有关连接特性的先验信息(如虚电路)实现这一点，例如，它所需的峰值带宽和平均带宽。必要时，为满足服务质量保证，ATM采用准入控制方法(admission control)，以阻止产生新的连接。

ATM的另一个优点是它采用交换，即使在局网域环境下也是如此，不像其他如以太网、令牌环和FDDI等局网域技术使用了如总线或环网等共享的方式。这使得ATM比其他技术更易保证服务质量。在ATM网络中采用的固定信元长度，特别有利于低成本、高速交换技术的开发。

ATM的各种较低层或物理层标准都已制定。这些标准包括从在双绞线铜缆上运行的25.6 Mb/s速率到在单模光纤上运行的622.08 Mb/s速率。其中，光接口是155.52 Mb/s，它用于1300 nm波段LED光源在多模光纤传输距离超过2 km。采用指定的最低发射和接收的功率，接口的损耗预算是9 dB。在这种情况下，使用的线路码是由光纤信道标准规定的(8，10)线路码。

这些接口用ATM术语来说被称为专网用户网络接口，因为它们在由民营企业拥有和管理的网络中用于互连ATM用户和交换机。也定义了一些公共用户网络接口，它们将ATM用户和交换机与公共的或运营商网络连接起来。对于后者，这些接口中的ATM使用PDH或SONET/SDH作为直接下层。这些接口分别在表3.1和表3.2所示的许多PDH和SONET/SDH速率标准中进行了定义。其中，有DS3、STS-3c、STS-12c和STS-48c接口。在ATM的标准术语中，因为ATM下面的层被称为物理层，所以这些连接到PDH和SONET/SDH的接口被称为物理层接口(physical layer interface)。另一方面，从1.4节中讨论过的传统的网络分层观点来看，当将ATM看成网络层时，PDH和SONET/SDH一定被看成数据链路层。

J.1 ATM 功能

ATM 数据可以从任一 ATM 用户通过用户-网络接口(UNI)传送到 ATM 网络,或数据能够通过网络到网络接口(NNI)在两个 ATM 交换机之间传送。在 ATM 信元 53 字节中,有 48 字节承载净荷,即从较高层送来的信息,而由 ATM 层插入的另外 5 字节构成信头。5 字节的 ATM 信头的结构对于 UNI 和 NNI 接口来说略有不同。两种信头结构如图 J.1 所示。

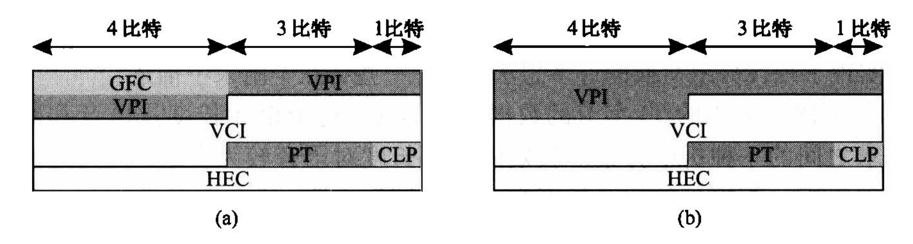


图 J.1 横跨(a)UNI 和(b)NNI 的 ATM 信元中的信头结构。GFC 字段用于经过UNI的流量控制。VPI和VCI字段用于网络内转发信元。PT表示净荷类型和 CLP 是信元丢弃优先级比特。HEC 字段提供ATM 信头差错检验

ATM 信头字段表示如下。

- GFC 或一般流量控制(Generic Flow Control):UNI 中占 4 比特,而 NNI 中无。
- VPI 或虚拟路径标识符(Virtual Path Identifier):UNI 中占 8 比特,NNI 中占 12 比特。
- VCI 或虚拟信道标识符(Virtual Channel Identifier①):16 比特。
- PT 或净荷类型(Payload Type):3 比特。
- CLP 或信元丢弃优先级(Cell Loss Priority):1 比特。
- HEC 或信头差错控制(Header Error Control):8 比特。HEC 在 5 字节的 ATM 信头中构成了循环冗余校验(CRC),用于检测损坏的 ATM 信元。

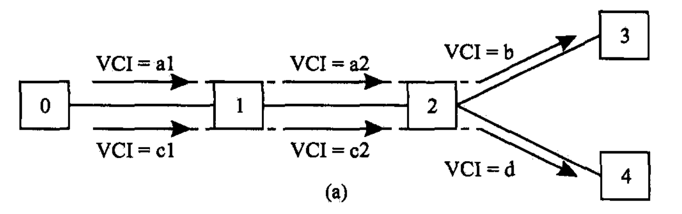
这些字段将在下面各节逐一描述其各自的功能。

J.1.1 连接和信元转发

为了在两个端点之间传输数据,ATM 在它们之间建立了一条连接。这与 IP 不一样(将在下一节中讨论),IP 以无连接方式传输数据。ATM 连接被称为虚拟信道(virtual channel),并被分配一个虚拟信道标识符(virtual channel identifier, VCI)。对于每一条链路,一条连接的 VCI 是唯一的,ATM 连接横跨两个端点,但会因在该条路径上各链路的不同而有所差异,如图 J.2(a)所示。例如,对于顶端那条连接在它经过的 3 条链路上的 VCI 值是 a1、a2 和 b。对该路径每一条链路上的每条连接,其 VCI 在该连接建立时确定,并在该连接被放弃时拆除。

每个节点(交换机)维护一张如图 J.2(b)所示的 VCI 对照表。该表对每个传入的 VCI 都指定了传出链路和传出 VCI。例如,在节点 1 中,带有 VCI 标识符 a1 的输入信元被送至带有 VCI 标识符 a2 的链路 1-2 上。

① 原书为“Virtual Circuit Identifier”——译者注。



传入的VCI	传出链路	传出的VCI
a1	1到2	a2
c1	1到2	c2

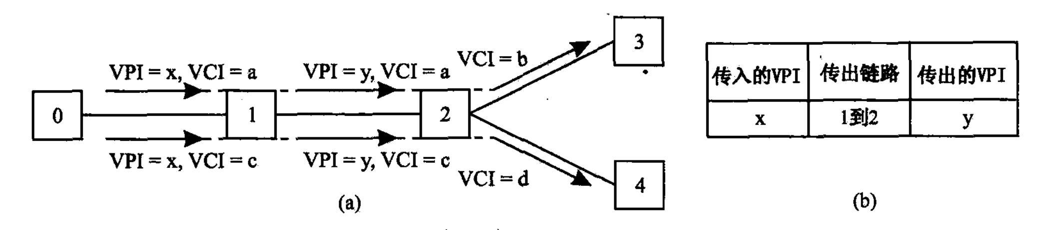
(b)

图 J.2　穿越一条路径时利用 ATM VCI 进行信元转发。ATM 交换机利用 VCI 来决定信元的传出链路。这些交换机还用分配给传出链路上虚拟信道的值改写VCI字段。(a)信元转发和VCI交换示意图;(b)在图(a)中节点1维护的VCI表

J.1.2　虚拟路径

有可能数以百万的虚拟信道共享一条链路。为转发每一个信元而查找超过 $2^{16} = 65\ 536$ 个条目的 VCI 表是成本昂贵的。因此，为了达到转发的目的，需要有一些机制来捆绑或集合虚拟信道。所以，相当有可能数以千计的虚拟通道将有相同的路径，如果不是端到端的，那么也至少遍布了网络的大部分。虚拟通道的这种性质可用于集合,并可利用 VPI 来实现。通过以下例子能理解 VPI 的使用。

考虑图 J.3。这里有 4 条连接节点 0、1、2 和 3 的链路，如图所示。两条虚电路共享链路 0-1 和 1-2。这些虚拟信道可以对这些链路的每一条分配一个共同的 VPI(一般来说，两条单独的链路上的 VPI 可以是不相同的)。例如，链路 0-1 可以赋予 VPI 值 x,链路 1-2 可以赋予 VPI 值 y。这两条链路一起在网络中构成了一条虚拟路径，节点 0 构成了这条虚拟路径的起始点，而节点 2 构成了这条虚拟路径的终结点。属于分配到这条路径上的任何一条虚电路的所有信元都基于较小的 VPI 值在这些链路上路由。当信元到达该条虚拟路径终点时，本例是节点 2，它们将依据 VCI 值再次转发。简而言之，虚拟信道将每条虚拟路径视为其在源和目标之间路由中的一段:在一条虚拟路径内的交换机仅基于 VPI 字段转发信元。



传入的VPI	传出链路	传出的VPI
x	1到2	y

图 J.3　利用 ATM VPI 来简化共享路由段的信元转发。共享一段共同的路由段的虚拟信道在该段的链路上被赋予相同的VPI值,并且在该段内的路由安排是基于较小的VPI字段,而不是VCI字段。(a)两条虚拟信道在链路0-1和链路1-2上分别被赋予相同的VPI值x和y;(b)在节点1的交换现在是基于VPI字段,从而只需要一个较小的运作表,就能够得到更有效的转换

使用两个级别的 VPI 和 VCI 标签简化了信元转发的过程，从而能够开发具有高成本效益的 ATM 交换机。如果使用单一的字段，则将使通过 UNI 需要 24 比特长度，通过 NNI 需要 28 比特长度。这么长的字段将使信元转发过程昂贵。

虚拟路径的另一个优点是，它使节点之间建立起逻辑链路:虚拟信道视两个节点之间的

这一条虚拟路径为一条逻辑链路。在图 J.3 的例子中，虚拟信道视从节点 0 到节点 2 之间的这一条虚拟路径为一条逻辑链路。

J.2 适配层

ATM 使用固定长度的信元来运送信息，但其既适用于连续的媒体，如语音或视频，也适用于长度可变的(以及长的)数据包，如 IP。在这种情况下，有必要将用户数据(语音、视频和 IP 数据包)映射到 ATM 信元。这是通过 ATM 适配层(AAL)来实现的。AAL 的主要功能是分割和重组(SAR):AAL 在源端将用户数据分段放入 ATM 信元，在目标端将这些 ATM 信元重新组合回用户数据。

在国际电联(ITU)所建议的 I.363 中，定义了 4 种 ATM 适配层:AAL-1、AAL-2、AAL-3/4 和 AAL-5。(AAL-3 和 AAL-4 开始时是分开的，但后来被合并成一种 AAL。)下面简要介绍 AAL-1 和 AAL-5。

J.2.1 AAL-1

AAL-1 用于传输恒定比特率的数据，如线路、语音和视频数据。这种情况下，可以认为信源发送连续的数据流。这些数据被 AAL-1 分割成 47 字节的 AAL 净荷。AAL-1 再加入 1 字节的信头，其中包含一个序列号字段，这样组成的 48 字节构成了 ATM 净荷。AAL-L 将该净荷送到 ATM 层，以传输至该网宿节点中同等的 AAL-1 过程。虽然序列号字段受 CRC 保护(4 比特的 SN 受一个 3 比特的 CRC 和 1 比特的奇偶校验的保护)，但 47 比特字节净荷是不受保护的。这已认为是足够的,因为设计 AAL-1 只是为了支持电路仿真和语音应用。

J.2.2 AAL-5

AAL-5 被设计用于在 ATM 网络上传输长度可变的数据包,包长可达 2^{16} = 65 536 字节。它最重要的用途是在 ATM 网络上传输 IP 数据包。AAL-5 将用户的数据包分段置入信元,但在每一信元中不添加任何开销(AAL 信头或报尾)。相反，它利用 ATM 信头中净荷类型字段来表明某信元是否就是分段后的 IP 数据包的最后一个信元。如果某信元就是分段后的 IP 数据包的最后一个信元，则该信元的最后 2 字节就构成了 AAL-5 的报尾,其中包含了 IP 数据包的长度和覆盖整个 IP 数据包的 CRC。因此除了一个信元外,所有的 AAL-5 净荷等于 48 字节的 ATM 净荷，与 AAL-1 相比,AAL-5 具有较少的开销。同时还注意到，AAL-5 利用 CRC 为它的净荷提供了差错检测，而 AAL-1 没该项功能。

J.3 服务质量

使用 ATM 的主要动机是它能够提供有服务质量(QoS)保证的连接。这些保证在信元丢失、信元延迟和抖动方面采用了界限的形式。ATM 通过流量整形和接入控制相结合的方法提供了这样的保证。粗略地说，这种工作方式如下:

1. **流量整形**:ATM 要求所有用户流量遵守用户和网络之间建立的合约。此合约通常规定峰值信元速率、平均信元速率和用户可以通过 UNI 传输的突发长度(峰值信元速率下连续信元的数量)。ATM 网络可以通过 UNI 监控每个连接的这些规定的参数，并可以删除那些违反本规定的信元。或者，它也可以允许违反规定的信元通过，但给这些信元的 CLP 位加以标记，以便在产生堵塞时让它们优先下路。因此，ATM 可以周密地从每个进入网络的连接中控制流量。网络的这种规定在某种程度上给用户在信元丢失、延迟和抖动方面提供了 QoS 保证。
2. **准入控制**:基于对用户流量强迫实行流量控制特点的知识，ATM 网络可以确定一组连接,在不损害已有连接有保证的 QoS 情况下,准许从这些连接通过网络传送信元。当一条新的连接可能会导致已经建立的连接得不到 QoS 保证时，将不会被准入接入网络。

基于网络可以 QoS 保证的参数(信元丢失、延迟和抖动)和用户可以指定的参数(峰值信元速率、信元平均速率和突发长度)，ATM 识别连接所属的一些业务类型。其中，有恒定比特率(CBR)和未特别指定比特率(UBR)的业务类型。一个 CBR 连接规定的只是峰值信元速率，并保证所规定的信元丢失、延迟和抖动指标。一个 UBR 连接也仅规定了峰值信元速率，但无 QoS 保证。AAL-1 专门支持 CBR 连接，而 AAL-5 用于 UBR 连接。

除了流量整形和准入控制外，QoS 保证的另一个方面是利用排队策略。ATM 利用先进的排队技术，以便在遇到其他业务类型的流量不遵守规则时确保满足每种业务类型的 QoS 保证。ATM 还利用先进的数学方法确定准入控制策略，以满足 QoS 保证。

J.4 流量控制

ATM 还提供了一种机制来控制用户的流量，不是依据预先规定的合约，而是依据网络中有关堵塞水平的反馈。这样一种机制主要适用于一些数据业务类型，如能采用流量控制的文件传输(但不适用于 CBR)。流量控制是经过 UNI 时利用 ATM 的 UNI 信头中的 GFC 字节来实现的。ATM 网络可以利用这些字节编码的消息通知经过 UNI 的用户，数据是可以传输或是应该停止。

J.5 信令和路由

虽然 VCI 和 VPI 字段被用于按给定路线转发 ATM 信元，但是确定该条路由是路由协议的职责。用于 ATM 网络中的路由协议是由 ATM 论坛制定的标准化协议:PNNI(专网到网络接口)和 B-ICI(宽带运营商间接口)。下面将简要概述 PNNI 路由协议。

PNNI 路由的目标是确定从信源到信宿经由网络的路径。这条路径应该能满足用户的 QoS 要求。网络中每条链路是由一组参数来描述其特征的，这组参数表达了链路的状态。链路状态参数包括信元损失、最大信元延迟及可用链路带宽。每条链路的另一个参数是其管理成本或权重。这反映了网络利用该条链路的成本。每个 ATM 交换机将这些参数都通知给从它传出的所有链路。这样，链路状态信息传遍了网络中所有其他 ATM 交换机。这些链路状态信息遍传的结果使每个 ATM 交换机具有当前所有链路状态的网络拓扑。利用

这些拓扑和链路状态信息，网络中接收到ATM连接请求的入口交换机可以计算出网络中这条连接所需的能够满足QoS保证的路径，并且能够最大限度地降低网络中的一些管理成本。

一旦计算出一条路由，则这条新连接及其QoS要求应该告知在该条路由上的每个交换机。还需要在每个交换机中设置VCI/VPI标签。这是通过PNNI信令协议完成的。一旦信令协议成功终结，连接设置也就完成了，并且数据流量能够开始传输。为了断开连接，将再次调用信令协议。

中英文术语对照表

absorption of photon	光子吸收
access network	接入网
accounting management	计费管理
ACTIVE state (OFC protocol)	ACTIVE(激活)状态[开放式光纤控制(OFC)协议]
adaptation management	适配管理
add/drop multiplexer (ADM)	分插复用器(ADM)
admission control	准入控制
agents, element management system (EMS)	网元管理系统代理
aggressive mode, RPR	弹性分组环激进模式
alarm indication signal(AIS)	告警指示信号(AIS)
alarm management	告警管理
alarm signal, OTN	OTN 告警信号
alarm(trap)	告警(陷阱)
all-optical design (lightpath topology)	全光设计(光路拓扑)
All-Optical Network (AON) consortium	全光网(AON)联盟
all-optical network	全光网
all-optical crossconnect(OXC)	全光交叉连接(OXC)
all-optical regeneration	全光再生
alternate port, Ethernet	以太网备用端口
American National Standards Institute (ANSI) standard	美国国家标准学会(ANSI)标准
amplified spontaneous emission (ASE)	放大的自发发射
amplifier noise	放大器噪声
amplifier	放大器
amplitude modulation of laser cavity gain	激光腔增益的幅度调制
AND gate	与门(AND)
apodized grating	切趾光栅
arrayed waveguide grating(AWG)	阵列波导光栅
arrival rate (deflection routing)	到达率(偏射路由)
assured forwarding(AF)	保证转发(AF)
asymmetric service	不对称的业务
asynchronous digital hierarchy	异步数字体系
asynchronous signal	异步信号
asynchronous transfer mode(ATM)	异步传输模式(ATM)
augmented model, control plane	控制平面扩展模型
automatic protection-switching(APS) protocol	自动保护倒换协议(APS)
availability of network circuit	网络电路可用性
avalanche breakdown	雪崩击穿
avalanche photodiode(APD)	雪崩光电二极管(APD)
average bandwidth	平均带宽
backbone destination address (B-DA)	骨干目的地址(B-DA)
backbone source address (B-SA)	骨干源地址(B-SA)
backbone tag (B-Tag)	骨干标签(B-Tag)
backup route	备用路由
backup tunnel, MPLS	多协议标签交换(MPLS)备用隧道
backward defect indicator(BDI)	后向缺陷指示符(BDI)
band drop architecture	波带下路结构
bandgap	带隙
bandwidth	带宽
bandwidth trading	带宽交易
bandwidth-on-demand service	按需带宽业务
baseband modulated fiber coax bus (BMFCB)	副载波调制光纤同轴总线(SMFCB)
best-effort service	尽力而为的业务

BGP (border gateway protocol)	边界网关协议
bidirectional protection switching	双向保护协议
bidirectional ring network	双向环网
bidirectional WDM system	双向 WDM 系统
birefringence	双折射
bit error rate (BER)	误码率(BER)
bit interleaving	比特间插
blazing (blazed gratings)	闪耀(闪耀光栅)
blocked port, Ethernet	以太网阻塞端口
blocking model (statistical dimensioning)	阻塞模型(统计设计)
blocking switche	阻塞开关
border gateway protocol (BGP)	边界网关协议(BGP)
BPDU (bridge protocol data unit)	桥协议数据单元(BPDU)
Bragg gratings	布拉格光栅
Bragg wavelength	布拉格波长
bridge protocol data unit(BPDU)	桥协议数据单元(BPDU)
broadband digital crossconnect(DCS)	宽带数字交叉连接设备(DCS)
broadcast and select ROADM	广播选择 ROADM
broadcast service	广播业务
bronze service class (example)	铜业务等级(例)
buffered data packet	缓存数据包
buffering	缓存
bulk mechanical switche	体机械开关
bulk micromachining	体微机械加工
burst switching	突发交换
bursty traffic	突发数据流
bypass tunnel, MPLS	多协议标签交换(MPLS)旁路隧道
cable network	有线电视网
cables, network	电缆, 网络
capital cost	资金成本
carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD)	载波监听多址访问/碰撞检测
carrier transport	载波传送
carriers (semiconductor optical amplifiers)	载流子(半导体光放大器)
cascaded Raman laser	级联拉曼激光器
cavity (laser)	腔(激光器)
CBR (constant-bit-rate connections)	恒定比特率连接
cell forwarding, ATM	ATM 信元转发
Cell Loss Priority byte (ATM)	信元丢弃优先级字节(ATM)
center frequency, pulse	脉冲中心频率
central office (CO)	中心局(CO)
centralized management	集中式管理
channel layer, SDH	SDH 信道层
channel spacing	信道间隔
chirp	啁啾
chirp factor	啁啾因子
chirped Gaussian pulse	啁啾高斯脉冲
chromatic dispersion	色度色散
circuit availability	电路可用性
circuit restoration	电路恢复
circuit switching	电路交换
circuit-switched network	电路交换网
circulator	环形器
cladding (optical fibers)	包层(光纤)
cladding mode	包层模
Class I safety standard	I 类安全标准
client frame, GFP	通用成帧规程(GFP)客户帧
client layers of optical layer	光层的客户层
clients, network	网络客户

client-specific aspect	GFP 客户专用部分
Clos switche	Clos 开关
closest-to-finish rule	小余量规则
coarse synchronization, obtaining	获得粗同步
coherent light	相干光
collision detection	碰撞检测
colorless output	无色的输出
common management information protocol (CMIP)	通用管理信息协议(CMIP)
common object request broker (CORBA) model	通用对象请求代理体系结构(CORBA)模型
competitive LEC (CLEC)	有竞争力的地方电信局
compliant wavelength interface	标准波长接口
component failure	组件故障
components of optical network	光网络组件
concatenated payload	串联的净荷
conduction band (SOA)	导带(SOA)
configuration management	配置管理
connection management	连接管理
connection trail	连接路径
connectionless service	无连接业务
connection-oriented service	面向连接业务
conservation of energy	能量守恒
conservative mode, RPR	弹性分组环(RPR)保守模式
constant-bit-rate (CBR) connection	恒定比特率(CBR)连接
contention for output port	输出端口冲突
contention resolution optic (CRO)	竞争解决光学(CRO)方案
conversion gain (blocking model)	转换增益(阻塞模型)
core (optical fiber)	纤芯(光纤)
Core Header, GFP	GFP 核心头
costs	成本
coupled mode theory	耦合模理论
coupler	耦合器
coupling coefficient	耦合系数
crossbar switche	纵横制开关
cross-gain modulation (CGM)	交叉增益调制(CGM)
crossover, with optical switche	光开关交叉路径
cross-phase modulation (CPM)	交叉相位调制(CPM)
crosstalk	串扰
customer destination address (C-DA)	用户目的地址(C-DA)
customer source address (C-SA)	用户源地址(C-SA)
customer tag (C-Tag)	用户标签(C-Tag)
cutoff wavelength	截止波长
data link layer, network	数据链路层，网络
data link protocol	数据链路协议
data packet	数据包
datagram service	数据报业务
deadlock	死锁
decentralized management	非集中式管理
decibel unit (dB)	分贝单位(dB)
decision circuit	判决电路
dedicated bandwidth	专用带宽
dedicated protection	专用保护
defect condition	缺陷条件
deflection index	偏射指数
deflection routing	偏射路由
deflection rule	偏射规则
degree, node	节点度
delay line	延迟线
delay	时延
demultiplexer	解复用器

depletion region, pn-junction	pn 结耗尽区
deploying network component	配置网络组件
deployment consideration	网络应用方面的考虑
deregulation of telephone industry	电信产业放松管制
designated port, Ethernet	以太网指定端口
diameter, network	网络直径
differential delay	微分时延
dichroic	二向色性
differential group delay (DGD)	微分群时延
diffraction pattern	衍射图样
Diff-Serv (differentiated service)	区分服务
digital wrapper technology	数字包封技术
dimensioning wavelength-routing network	波长路由网络容量设计
direct modulation	直接调制
directional coupler	定向耦合器
dispersion	色散
dispersion-shifted fiber(DSF)	色散位移光纤
distributed Bragg reflector (DBR) laser	分布布拉格反射(DBR)激光器
distributed network control	分布式网络控制
distribution network	分配网
double heterojunction structure	双异质结结构
drop-and-continue functionality	下路并续传功能
dual homing	双归属
dual queue mode, RPR	RPR 双队列模式
dynamic range, front-end amplifiers	前置放大器动态范围
dynamic wavelength crossconnect(WXC)	动态波长交叉连接(WXC)
EA modulator	EA 调制器
E-band system	E 波段系统
edge-emitting laser	边发射激光器
electro-absorption (EA) modulator	电吸收(EA)调制器
electronic time division multiplexing (TDM)	电时分复用
electronics in optical network	光网络中电子器件
electrons (semiconductor optical amplifier)	电子(半导体光放大器)
electro-optic switche	电-光开关
element management system (EMS)	网元管理系统(EMS)
elements of optical network	光网元
emission of photon	光子发射
energy band	能带
erbium-doped fiber amplifier(EDFA)	掺铒光纤放大器
energy conversation	能量守恒
equalization of gain (EDFA)	增益均衡(EDFA)
equipment interoperability	设备的互操作性
equipment management	设备管理
etalon	标准具
Ethernet	以太网
Ethernet Ring Protection (ERP)	以太环网保护(ERP)
excess loss (coupler)	过量损耗(耦合器)
excited state absorption	激发态吸收
expedited forwarding (EF)	加速转发(EF)
explicit routing, MPLS	多协议标签交换(MPLS)显式路由
external cavity laser	外腔激光器
external modulation	外调制
Fabry-Perot (FP) laser	法布里-珀罗(FP)激光器
Fabry-Perot amplifier	法布里-珀罗(Fabry-Perot)放大器
Fabry-Perot cavity	法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔
Fabry-Perot filter	法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器
facets (laser)	端面(激光器)
facility backup, MPLS	多协议标签交换(MPLS)设备备用方法
fairness, RPR	弹性分组环(RPR)公平性

fairness eligible (FE) packet	公平合格(FE)的数据包
Faraday factor	法拉第因子
fast reroute mechanism, MPLS	MPLS 快速重路由机制
fault management	故障管理
Fault Type and Fault Location byte, OTN	OTN 故障类型和故障定位字节
feedback delay line	反馈延迟线
feeder network	馈送网
feed-forward delay line	前馈延迟线
festoon	彩穗型
fiber	光纤
fiber delay line	光纤延迟线
fiber grating	光纤光栅
fiber laser	光纤激光器
fiber to the building (FTTB)	光纤到大楼(FTTB)
fiber to the cabinet (FTTCab)	光纤到交换箱(FTTCab)
fiber to the curb (FTTC)	光纤到路边
fiber to the home (FTTH)	光纤到户
fiberless system (optical)	无线光通信系统
Fibre Channel standard	光纤信道标准
fine synchronization, obtaining	获得精细同步
finesse, filter	滤波器细度
first fit algorithm	首次适应算法
first-generation optical network	第一代光网络
first-passage model (statistical dimensioning)	首次穿越模型(统计容量设计)
fixed multiplexing	固定复用
fixed traffic matrix	固定的流量矩阵
fixed-size packet	固定长度的数据包
fixed-wavelength conversion	固定波长转换
fixed-wavelength laser	固定波长激光器
flattening EDFA gain	平坦 EDFA 增益
flooding	扩散
flow control, ATM	ATM 流控制
fluoride fiber	氟光纤
forecasting fixed traffic matrice	预测固定流量矩阵
forward defect indicator (FDI)	前向缺陷指示符(FDI)
forward equivalence classe	转发等效类
forward error correction (FEC)	前向纠错码
four-wave mixing (FWM)	四波混频
frame bursting	帧突发
frame multiplexing (GFP)	帧复用(GFP)
frame relay service	帧中继业务
frame structure	帧结构
framing protocol	成帧协议
framing pulse	成帧脉冲
free-space laser	自由空间激光
frequency division multiplexing (FDM)	频分复用
frequency modulation of laser cavity gain	激光腔增益的频率调制
front-end amplifier	前置放大器
full service	全业务
fundamental mode, waveguide	波导基模
gain medium (cavity), laser	激光器增益介质(腔)
gain modulation, laser	激光器增益调制
Gaussian distribution	高斯分布
Gaussian pulse, chirped	啁啾高斯脉冲
Gaussian random process	高斯随机过程
Gigabit Ethernet	千兆以太网
Gigabit PON (GPON) standard	千兆无源光网络(GPON)标准
gigahertz	吉赫兹(GHz)
gold service class (example)	金业务等级(例)

grants, OPU	光信道净荷单元 OPU 授权
grating circle (arrayed waveguide grating)	光栅圆(AWG)
grating equation	光栅方程
grating external cavity laser	光栅外腔激光器
grating plane	光栅平面
grating-coupled sampled reflector (GCSR) laser	光栅耦合取样反射(GCSR)激光器
grating	光栅
grooming	梳理
group velocity	群速度
group velocity dispersion (GVD)	群速度色散
guaranteed bandwidth service	保证带宽业务
half-wave plate	半波片
head end	头端
header error check (HEC) based frame delineation	基于帧划分的信头差错校验
Header Error Control byte (ATM)	信头差错控制字节(ATM)
header processing, PPS network	PPS 网络信头处理
head-of-line (HOL) blocking	线端(HOL)阻塞
helical LAN (HLAN)	螺旋局域网(HLAN)
hertz	赫兹(Hz)
heterostructure (semiconductor)	异质结构(半导体)
high-channel-count multiplexer architecture	多信道数复用器结构
higher-order nonlinear susceptibilitiy	高阶非线性磁化率
high-impedance front-end amplifiers	高阻前置放大器
high-level data link control (HDLC) protocol	高级数据链路控制协议(HDLC)
high-power pump source	高功率泵浦源
hold-off time	拖延时间
hole (semiconductor optical amplifier)	空穴(半导体光放大器)
hops, number of (example)	跳数(例)
horizontal partitioning	水平划分
hot spot, wireless	无线热点
hubs, network	网络枢纽节点
human error, failure from	人为失误产生的故障
hybrid fiber coax (HFC) network	混合光纤同轴(HFC)网
imaging plane (grating)	像平面(光栅)
incumbent LEC (ILEC)	传统本地电信局
index of refraction	折射率
information model (IM)	信息模型(IM)
infrastructure	基础设施
inheritance (object-oriented modeling)	继承性(面向对象建模)
input buffering, PPS network	PPS 网络输入缓存
input impedance	输入阻抗
insertion loss	插入损耗
integrated circuit (IC)	集成电路
interchannel spacing	信道间间隔
interconnected ring	互连的环网
interdomain routing protocol	域间选路协议
interexchange carrier (IXC)	长途电信局
interference length (blocking model)	干扰长度(阻塞模型)
interference of optical wave	光波干涉
interfering lightpath (blocking model)	干扰光路(阻塞模型)
interleaving	间插
intermodal dispersion	模间色散
interoffice network	局间网络
interval graph	区间图
intrinsic impedance	固有阻抗
isolator	隔离器
jitter	抖动
jumbo frame	巨型帧
Just-Enough-Time (JET) protocol	恰量时间协议(JET)

label swapping (label switching)	标签交换
label-switched path (LSP)	标签交换路径(LSP)
large electronic switche	大型电开关
large optical switche	大型光开关
laser array	激光器阵列
laser	激光器
lasing threshold	激射阈值
lasing wavelength of tunable laser	可调谐激光器的激射波长
latching switche	闭锁开关
layered network infrastructure	分层网络基础设施
long-haul network	长途网络
lead service class (example)	铅业务等级(例)
life cycle cost	生命周期成本
light propagation	光传输
light source	光源
light-emitting diode (LED)	发光二极管
lightpath topologie	光路拓扑
lightpath	光路
limited wavelength conversion	有限波长转换
limited-buffer deflection routing	有限缓存偏射路由
line amplifier	线路放大器
line network	线性网络
line terminal	线路终端
linear program (LP)	线性规划
linear protection	线性保护
linear susceptibility	线性磁化率
linearly chirped pulse	线性啁啾脉冲
link aggregation group (LAG)	链路汇聚组(LAG)
link bundling	链路捆绑
link state packet	链路状态数据包
link trace message	链路踪迹信息
links, network	网络链路
liquid crystal switche	液晶开关
lithium niobate modulator	铌酸锂调制器
livelock	活锁
load, request	请求负载
load impedance	负载阻抗
local fair rate	本地公平速率
local management system	本地管理系统
local-area network (LAN)	区域网
local-exchange carrier (LEC)	本地电信局
locked payload	锁定的净荷
logical (virtual) topology	逻辑(虚)拓扑
logical AND gate	逻辑与门
long-haul network	长途网络
longitudinal mode, laser	激光器纵模
long-period fiber grating	长周期光纤光栅
loopback message	环回信息
loss	损耗
Mach-Zehnder interferometer	马赫-曾德尔干涉仪
Manhattan Street network	曼哈顿街网
maximum load dimensioning model	最大负载容量设计模型
max-used-1 and -2 RWA algorithm	最大使用算法-1和最大使用算法-2 RWA 算法
Maxwell distribution	麦克斯韦分布
Maxwell's equation	麦克斯韦方程
mechanical tuning of filter	滤波器的机械调谐
mechanical tuning of laser	激光器的机械调谐
megahertz	兆赫兹(MHz)
MEMS switche	微电机械系统开关

merge point (MP)	合入点(MP)
mesh protection scheme	网状网保护方案
metropolitan (metro) network	城域网
micro-electro-mechanical system (MEMS) switche	微电机械系统开关
micrometer (micron)	微米
minimum disjoint paths problem	最少不相交路径问题
misrouting packet	错误路由数据包
mixing probability	混合概率
mode-locked laser	锁模激光器
modular OADM architecture	模块化 OADM 结构
modulated laser	调制激光器
multicasting	多播
multicavity filter	多腔滤波器
multiplexer	复用器
multiplexing	复用
multiplicative gain	倍增增益
multiport bridges, Ethernet	以太网多端口桥
multiprotocol label switching (MPLS)	多协议标签交换
multistage interleaver	多级间插器
nanometer	纳米
narrowcasting mode (enhanced HFC)	窄带广播模式(增强型 HFC)
network cable	网络缆线
network deployment	网络部署
network design	网络设计
network element	网元
network infrastructure	网络基础设施
network layer	网络层
network link	网络链路
network restoration	网络恢复
network router	网络路由器
network survivability	网络生存性
network topology	网络拓扑
network transparency	网络透明性
next hop backup tunnel	下一跳备用隧道
next-next hop backup tunnel	下-下一跳备用隧道
node failures, handling	节点故障处理
noise	噪声
nonblocking switche	无阻塞开关
noncompliant wavelength interface	非标准波长接口
nonlinear effects in optical fiber	光纤中非线性效应
nonlinear optical loop mirror (NOLM)	非线性光环镜(NOLM)
nonlinear polarization	非线性偏振
nonlinear propagation coefficient	非线性传输系数
nonlinear Schrdinger equation (NLSE)	非线性薛定谔方程
nonreciprocal device	非互易器件
nonrevertive protection scheme	不可恢复的保护方案
nontransparent network	非透明网络
notification message	通知信息
n-stage planar architecture	N 级平面结构
object-oriented modeling	面向对象建模
offline computation of protection route	保护路由的离线计算
offline RWA problem	离线 RWA 问题
1 + 1 protection	1 + 1 保护
1:1 protection	1:1 保护
1:N protection	1:N 保护
online computation of protection route	保护路由在线计算
on-off keying (OOK)	开关键控(OOK)
opaque network	不透明网络
operations cost	经营成本

optical add/drop multiplexer	光分插复用器
optical amplifier	光放大器
optical AND gate	光与门
optical channel data unit (ODU)	光信道数据单元
optical channel (OCh) layer	光信道(OCh)层
optical channel payload unit (OPU)	光信道净荷单元(OPU)
optical channel transport unit (OTU)	光信道传送单元(OTU)
optical channel	光信道
optical connector, shuttered	带遮板的光连接器
optical crossconnect (OXC)	光交叉连接
optical fiberless system	无线光通信系统
optical fiber	光纤
optical filter	光滤波器
optical gating	光栅
optical layer design	光层设计
optical layer of network infrastructure	网络基础设施的光层
optical line amplifier	光线路放大器
optical multiplexed section (OMS)	光复用段(OMS)
optical network design	光网设计
optical network element	光网元
optical network survivability	光网络生存性
optical network unit (ONU)	光网络单元(ONU)
optical networking component	光组网组件
optical networking standard	光组网标准
optical packet switching	光分组交换
optical path trace	光路径轨迹
optical power and loss	光功率和损耗
optical safety	光安全性
optical solution	光解决方案
optical supervisory channel (OSC)	光监控信道
optical switche	光开关
optical time division multiplexing (OTDM)	光时分复用(OTDM)
optical trace	光踪迹
optical transmission section (OTS)	光传输段(OTS)
Optical Transport Network (OTN)	光传送网(OTN)
optical-to-electrical-to-optical (OEO) converter	光电光(OEO)转换器
optimum pulse width (chromatic dispersion)	最佳脉冲宽度(色散)
optoelectronic wavelength conversion	光电波长转换最佳脉冲宽度
order, grating	光栅的级数
out-of-band network	带外网络
output buffering, PPS network	PPS 网络输出缓存
output port contention	输出端口冲突
overhead byte	开销字节
overlay model, control plane	控制平面重叠模型
overlay plus model, control plane	控制平面重叠+模型
packet forwarding	数据包转发
packet interleaving	包间插
packet switching	分组交换
packet transport service	数据包传送业务
packet, fixed-size	固定长度的数据包
parallel OADM architecture	并联 OADM 结构
partitioning, security	安全性划分
passband, filter	滤波器通带
passive optical network (PON)	无源光网络(PON)
path switching	路径交换
path trace	路径踪迹
peak bandwidth	峰值带宽
peer model, control plane	控制平面对等模型
penultimate hop popping	倒数第二跳消除处理

performance management	性能管理
permanent lightpath	永久光路
phase lock loop (PLL)	锁相环
phase mask	相位掩模
phase shift	相位移
phase velocity	相速
phase-matching condition (Bragg grating)	相位匹配条件(布拉格光栅)
photocurrent	光电流
photodetector	光检测器
photodiode	光电二极管
photonic packet-switching (PPS) network	光分组交换(PPS)网
photon	光子
photosensitivity of optical fiber	光纤光敏特性
physical coded sublayer (PCS)	物理编码子层
physical layer, network	网络物理层
physical topology	物理拓扑
piezoelectric filter	压电滤波器
pilot tone	导频
pin photodiode	pin 光电二极管
ping message	探索器信息
pitch, grating	光栅节距
pn-junction	pn 结
point of local repair (PLR)	本地修复点(PLR)
point-to-point link	点至点链路
point-to-point protocol (PPP)	点对点协议
point-to-point WDM ring	点至点 WDM 环
Poisson distribution	泊松分布
Poisson random process	泊松随机过程
polarization	偏振
polarization-dependent loss (PDL)	偏振相关损耗
polarization-mode dispersion (PMD)	偏振模色散
policing	监控
polymer switche	聚合物开关
population inversion	布居数反转
port contention	端口冲突
power	功率
power amplification	功率放大
power spectrum	功率谱
power transfer function	功率传递函数
practical network	实际网络
preamble, Ethernet	以太网前导码
precomputed protection route	预先计算的保护路由
preplanned protection rerouting	预先规划重路由
primary transit queue (PTQ), RPR	RPR 主过环队列(PTQ)
private line service	专用线路业务
private network	专用网
private network-to-network interface routing	专网到网络接口路由
private user-network interface	专网用户网络接口
propagation delay (deflection routing)	传输时延(偏射路由)
propagation mode	传输模式
protect path	保护路径
protection route	保护路由
protection routing table	保护路由表
protection switching	保护交换
protocol transparency	协议透明性
Provider Bridge	运营商桥接技术
pseudowire technology	伪线技术
public network	公共网络
public user-network interface	公共用户网络接口

public-switched telephone network (PSTN)	公共交换电话网(PSTN)
pulse walk-off	脉冲走离现象
pulse	脉冲
pump laser	泵浦激光器
pump power	泵浦功率
pumped laser	被泵浦的激光器
quality of service (QoS)	服务质量
quantum well structure	量子阱结构
queueing data packet	排队的数据包
queueing delay (deflection routing)	排队延迟(偏射路由)
random access memory	随机存取存储器
random deflection rule	随机偏射规则
random process, about	有关随机过程
random variable, about	有关随机变量
random-1 and -2 RWA algorithm	随机算法-1 和-2 路由和波长分配算法
ranging (ONU)	距离修正(ONU)
rapid spanning tree protocol (RSTP)	快速生成树协议(RSTP)
rate-preserving overhead	速率保持开销
rearrangeably nonblocking switche	可重构无阻塞开关
receiver (detector)	接收机(检测器)
reciprocal device	互易器件
reflection coefficient	偏射系数
reflection grating	反射光栅
reflectivity, mirror	反射镜的反射率
refractive index	折射率
regenerator	再生器
regenerator-section layer (SDH)	再生段层(SDH)
regional Bell operating companie (RBOC)	地方贝尔运营公司(RBOC)
relative phase shift, output	相对相移，输出端
reliability	可靠性
remote node (RN)	远程节点(RN)
repeater	中继器
request load	所需负载
reshaping	整形
Resilient Packet Ring (RPR)	弹性分组环(RPR)
resonant wavelength	谐振波长
responsivity, photodetector	光检测器响应度
return-to-zero (RZ) modulation	归零码(RZ)调制
reuse factor	重用因子
reverse-bias pn-junction	反向偏置 PN 结
revertive protection scheme	可恢复的保护方案
ring network	环形网
ring protection link (RPL)	环保护链路(RPL)
ring switching	环交换
rounding	取整法
route computation	路由计算
router function	路由器功能
routes, network	网络路由
routing and wavelength assignment (RWA)	路由与波长分配(RWA)
Rowland circle construction	罗兰圆结构
sampled grating DBR laser	取样光栅 DBR 激光器
saturation effect	饱和效应
scattering matrix	散射矩阵
Schrdinger equation, nonlinear (NLSE)	非线性薛定谔方程
security management	安全管理
self-healing ring	自愈环
semiconductor optical amplifier	半导体光放大器
semiconductor optical amplifier (SOA)	半导体光放大器(SOA)
serial (de)multiplexing	串联(解)复用器

server layer　业务层
service access point (SAP)　业务接入点(SAP)
service tag (S-Tag)　业务标签(S-Tag)
service transparency　业务透明性
service　业务
shared bandwidth　共享带宽
shared protection　共享保护
shared risk link group (SRLG)　共享风险链路组(SRLG)
sheath mile　护套英里
short-haul interoffice connection (SONET/SDH)　短距离局间连接(SONET/SDH)
short-period fiber grating　短周期光纤光栅
shot noise　散粒噪声
shufflenet network　混洗网
shuttered optical connector　带遮板的光连接器
side-mode suppression ratio　边模拟制比
signal frequency　信号频率
signal modulation　信号调制
signal propagation　信号传输
signal source　信号源
signal transparency　信号透明性
signal wavelength　信号波长
signaling channel　信令信道
signaling network　信令网
signaling protocol　信令协议
signal, defect　缺陷信号
single queue mode, RPR　RPR 单一队列模式
single-cavity dielectric thin-film filter　单腔介质薄膜滤波器
single-stage (de)multiplexer　单级(解)复用器
slab waveguide　薄(平)板波导
small-buffer deflection routing　小缓存器
soliton trapping　孤子俘获
soliton-trapping AND gate　孤子俘获与门
soliton　孤子
SONET (synchronous optical network)　同步光纤网络(SONET)
space division multiplexing (SDM)　空分复用(SDM)
spacing　间隔
span switching　跨距倒换
spare cards, wavelength-specific　特定波长备用线卡
spatial walk-off polarizer (SWP)　空间分离偏振器(SWP)
SPE (synchronous payload envelope)　同步净荷包
spectral components of pulse　脉冲谱分量
spectral efficiency　频谱效率
spectral width, laser　激光器谱宽
spectrum　谱
spontaneous emission　自发发射
spontaneous emission lifetime　自发发射寿命
squelching　抑制
stability, wavelength　波长稳定性
stacked ring　叠环网
standard channel　标准信道
standard　标准
star couplers　星形耦合器
Stark effect　斯塔克效应
Stark splitting　斯塔克分裂
state of polarization (SOP)　偏振态
static wavelength crossconnect (WXC)　静态的波长交叉互连(WXC)
statistical multiplexing　统计复用
steering (protection switching)　源路由方式(保护倒换)
stimulated emission　受激发射

storage-area network (SAN)	存储区域网(SAN)
store-and-forward network	存储转发网络
strict-sense nonblocking switche	严格无阻塞开关
self-healing ring	自愈环
subrate multiplexing	子速率复用
surface micromachining	表面微加工
surface-emitting laser	面发射激光器
survivability, network	网络生存性
switch fabric	开关结构
switched service	交换业务
switche	开关
switching time	交换时间
symmetric service	对称业务
synchronization	同步
telecommunications service	电信业务
telephone network	电话网
telephony passive optical network (TPON)	电话无源光网络
temperature coefficients of filter	滤波器温度系数
terahertz	太赫兹(THz)
terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)	太赫兹光非对称解复用器(TOAD)
terminal multiplexer (TM)	终端复用器(TM)
terrestrial network	地面网络
thermal noise	热噪声
thermalization	热化过程
thermoelectric (TE) cooler	热电(TE)致冷器
thermo-optic switche	热光开关
thin-film filter	薄膜滤波器
throughput	吞吐量
time division multiplexing (TDM)	时分复用(TDM)
timing jitter, requirements for	定时抖动要求
topology	拓扑
traceroute message	踪迹路由信息
traffic delay	流量时延
traffic matrix	流量矩阵
traffic pattern	流量模型
tTransaction Language-1 (TL-1)	事务处理语言-1(TL-1)
transfer function	传递函数
transimpedance front-end amplifier	互阻前置放大器
transmission grating	透射光栅
transmission layer design	传输层设计
transmission link standard	传输链路标准
transmission rate	传输速率
transmitter	发射机
transparency	透明性
transparent network	透明网络
transponder	转发器
traps (alarm)	陷阱(告警)
trunking efficiency	干线效率
tunable delay line	可调谐延迟线
tunable filter	可调谐滤波器
tunable laser	可调谐激光器
tunneling	隧道工程
twisted-pair telephone access network	双绞线电话接入网
2-connected topology	双连接拓扑
two-cavity dielectric thin-film filter	二腔介质薄膜滤波器
type-length-value (TLV)	类型-长度-值(TLV)
ultra-long-haul (ULH) network	超长距离网络
undersea	海底超长距离网络
unidirectional protection switching	单向保护倒换

uniform traffic pattern	均匀流量模型
user-network interface	用户-网络接口
vacuum, intrinsic impedance of	真空的固有阻抗
valence band (SOA)	价带(SOA)
value, mathematical program	数学规划值
variable optical attenuator (VOA)	可变光衰减器
vertical partitioning	垂直划分
virtual (logical) topology	虚拟(逻辑)拓扑
virtual circuit (VC)	虚电路(VC)
virtual concatenation (VCAT)	虚串联(VCAT)
virtual container (VC)	虚容器
virtual fiber	虚拟光纤
virtual tributarie (VT)	虚拟支线(VT)
walk-off phenomenon	分离现象
wave equations	波动方程
wave mixing	波混频
wavelength	波长
wavelength blocker	波长阻断器
wavelength conversion	波长转换
wavelength converter	波长变换器
wavelength crossconnect (WXC)	波长交叉连接(WXC)
wavelength dimensioning problem	波长容量设计问题
wavelength division multiplexing (WDM)	波分复用(WDM)
wavelength drift	波长漂移
wavelength filter	波长滤波器
wavelength multiplexer	波长复用器
wavelength plane	波长平面
wavelength reuse	波长重用
wavelength reuse factor	波长重用因子
wavelength assignment algorithms	波长分配算法
wavelength selective switches (WSS)	波长选择开关(WSS)
wavelength stabilization	波长稳定
wavelength-dependent coupler	波长有关的耦合器
wavelength-independent coupler	波长无关的耦合器
wavelength-routing network	波长路由网络
wavelength-specific spare card	特定波长备用线卡
wide-area network (WAN)	广域网(WAN)
wideband digital crossconnect (DCS)	宽带数字交叉连接(DCS)
wide-sense nonblocking switche	广义无阻塞开关
wireless access	无线接入
working path	工作路径
rapping (protection switching)	环回方式(保护倒换)